

693.5
806
s c1



**STUDI EKSPERIMENTAL MENGENAI
EFEKTIFITAS KEKANGAN TULANGAN LATERAL
PADA BETON PENAMPANG PERSEGI**

TESIS

**Disusun Dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Program Magister Teknik Sipil**

Oleh

**Soehartono
NIM : L4A 002 073**

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2004**

HALAMAN PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMENTAL MENGENAI EFEKTIFITAS KEKANGAN TULANGAN LATERAL PADA BETON PENAMPANG PERSEGI

Disusun Oleh :

Soehartono
NIM : L4A 002 073

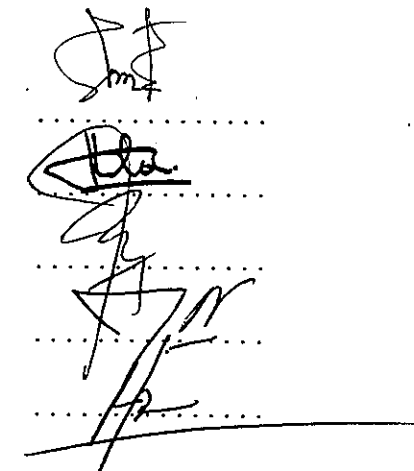
Dipertahankan di depan Tim Penguji pada tanggal :

22 Oktober 2004

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk
memperoleh gelar Magister Teknik Sipil

Tim penguji :

1. Ketua : Sukamta, ST, MT
2. Sekretaris : Dr.Ir. Antonius, MT
3. Anggota 1 : Dr. Ir. Nuroji, MS
4. Anggota 2 : Ir. Purwanto, MS
5. Anggota 3 : Ir. Himawan Indarto, MS

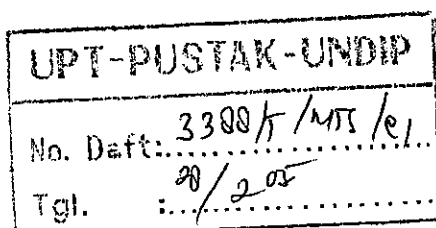


Semarang, 22 Oktober 2004

Universitas Diponegoro
Program Pascasarjana
Magister Teknik Sipil
Ketua,



Dr. Ir. Suripin, M.Eng
NIP. 131.668/511



ABSTRAK

Tesis ini menyajikan suatu studi eksperimental mengenai perilaku kolom beton penampang persegi yang dipasang tulangan lateral. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku kekuatan dan daktilitas struktur kolom beton penampang persegi. Efektifitas tulangan lateral dalam mengontrol deformasi kolom adalah kajian utama dalam studi ini. Beberapa parameter desain seperti kuat tekan (f_c'), rasio tulangan lateral (ρ_s) dan konfigurasi tulangan lateral merupakan faktor – faktor yang mempengaruhi kekuatan dan daktilitas kolom.

Studi eksperimental ini dilakukan dengan membuat benda uji kolom pendek (*short coloumn*) sebanyak 23 buah. Kolom didesain tanpa selimut beton dan tanpa menggunakan tulangan longitudinal, dengan ukuran 100 x 100 mm dan tinggi 5 (lima) kali lebar kolom. Sedangkan daerah uji (*test region*) sebesar 200 mm, ditempatkan ditengah – tengah kolom.

Hasil dari penelitian ini diantaranya menunjukkan bahwa semakin tinggi kuat tekan beton, maka efektifitas kekangan cenderung menurun. Semakin rapat spasi tulangan lateral akan meningkatkan kekuatan dan daktilitas beton terkekang. Hasil eksperimen juga dibandingkan dengan model – model kekangan dari model Cusson, model Imran dan model Antonius. Untuk beton mutu rendah ($f_c' < 40$ MPa), model Imran yang mendekati hasil eksperimen dengan konfigurasi tulangan lateral A, sedangkan pada beton mutu menengah ($40 < f_c' < 60$ MPa), model Cusson dan model Antonius yang paling mendekati hasil eksperimen dengan konfigurasi tulangan lateral A. Kolom dengan konfigurasi tulangan lateral C lebih mendekati model Cusson. Beton mutu tinggi ($f_c' > 60$ MPa), model Cusson dan model Antonius yang paling mendekati hasil eksperimen dengan konfigurasi tulangan lateral A. Beton mutu menengah ($40 < f_c' < 60$ MPa) maupun beton mutu tinggi ($f_c' > 60$ MPa) dengan pemasangan spasi tulangan lateral yang lebarnya sama dengan lebar inti kolom beton akan menjadi tidak efektif (*Unconfined*).

ABSTRACT

This thesis provides a experimental study concerning the behavior of square concrete column which is completed with lateral reinforcement. This research is aimed to know the behavior of strength and ductility of square concrete column structure. Effectiveness of lateral reinforcement in controlling column deformation is the main purpose in this study. Some design parameters such as compressive strength (f_c'), lateral reinforcement ratio (ρ_s) and lateral reinforcement configuration are the factors that influence the strength and ductility of column.

A total of 23 short column specimens were made in the experimental study. The column is designed without concrete cover and without longitudinal reinforcement, of the size 100 x 100 mm and high 5 time of column width. While the test region is 200 mm, located in the middle of the column.

The results of this research indicates that the high of the comprehensive strength of the concrete, the confinement effectiveness tends to decrease. The tighter the lateral reinforcement will improve the strength and ductility of confined concrete. The results of experiment is then also compared to the confined models, those are Cusson's model, Imran's model and Antonius's model. The specimens subjected to the low confinement ($f_c' < 40$ MPa), Imran's model gives the closest result of experiment with configuration of lateral reinforcement A, while the specimen subjected to middle confinement ($40 < f_c' < 60$ MPa), Cusson's model and Antonius's model give the closest result with configuration of lateral reinforcement A. Column with configuration of lateral reinforcement C the Cusson's model is the closest. The high confinement ($f_c' > 60$ MPa), Cusson's model and Antonius's model are the closest experiment result with configuration of lateral reinforcement A. The specimens subjected to middle confinement ($40 < f_c' < 60$ MPa) and high confinement ($f_c' > 60$ MPa) with the distance of lateral reinforcement if equal to wide is concrete column core is not effective (Unconfined).

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan Puji Syukur Kehadirat Tuhan Yang Maha Kuasa sehingga penelitian dan penulisan tesis dengan judul **Efektifitas Kekangan Tulangan Lateral Pada Beton Penampang Persegi** ini dapat diselesaikan. Penulisan tesis merupakan salah satu persyaratan untuk menyelesaikan Program Magister di Universitas Diponegoro Semarang.

Tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, tidaklah mungkin bagi penulis untuk menyelesaikan penelitian ini. Atas bimbingan, baik langsung maupun tidak langsung, yang penulis dapatkan sejak awal hingga akhir studi, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr.Ir Antonius, MT dan Bapak Sukamta, ST, MT, selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu untuk memberikan pengarahan, bimbingan dan masukan dalam penelitian dan penulisan tesis ini.
2. Bapak Dr.Ir Nuroji, MS., Bapak Ir. Purwanto, MS dan Bapak Ir. Himawan Indarto, MS selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan petunjuk, saran dan masukan yang sangat berharga bagi penulis.
3. Bapak Ir. Sri Tadjono, MS selaku Kepala Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil.
4. Bapak Ir. Parang Sabdono, M.Eng selaku Wakil Kepala Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil.
5. Seluruh Dosen Program Pascasarjana Konsentrasi Teknik Struktur Jurusan Teknik Sipil UNDIP.
6. Seluruh staf dan tehniisi Laboratorium Mekanika Struktur PPAU – ITB Bandung.
7. Seluruh staf Administrasi Program Pascasarjana Jurusan Teknik Sipil UNDIP Semarang.
8. Seluruh staf dan tehniisi Laboratorium Struktur dan Bahan Bangunan Jurusan Teknik Sipil UNDIP Semarang.
9. Istri dan anak – anak penulis, yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan moril serta semangat agar penulis segera menyelesaikan studi ini.

Penulis menyadari masih banyak sekali kekurangan dalam penulisan tesis ini, saran dan kritik yang membangun dari semua pihak untuk kesempurnaan penulisan ini sangat diharapkan.

Semarang, Oktober 2004.

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH	xi
DAFTAR NOTASI	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xv

BAB. I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Ruang Lingkup Penelitian	3
1.5. Alur Penelitian (<i>flow chart</i>)	4
1.6. Sistematika Penulisan	5

BAB. II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perilaku Mekanik Beton Terhadap Beban Uniaksial	6
2.2. Perilaku Mekanik Beton Terhadap Beban Triaksial	8
2.3. Perilaku Kolom Beton Terhadap Beban Aksial Konsentris	10
2.4. Perilaku Tegangan – Regangan Beton Terkekang	11
2.4.1. Mekanisme Keruntuhan Beton Terkekang	13
2.4.2. Pengaruh Kuat Beton (f_c')	14
2.4.3. Pengaruh Spasi Tulangan Lateral	15
2.4.4. Pengaruh Tegangan Leleh Pada Tulangan Lateral	15
2.4.5. Tegangan Lateral Efektif	16

2.5.	Model – Model Kekangan	18
2.5.1.	Model Imran dkk.	18
2.5.2.	Model Cusson dan Paultre	19
2.5.3.	Model Antonius dkk.	22

BAB. III METODOLOGI DAN PROGRAM EKSPERIMEN

3.1.	Metode dan Desain	24
3.2.	Material	24
3.3.	Pengujian Kolom	25
3.4.	Prosedur Pembebanan dan Akuisisi Data	26
3.4.1.	Tegangan Beton Terkekang	29
3.4.2.	Tegangan Tulangan Lateral	29
3.4.3.	Regangan Beton	29

BAB. IV HASIL EKSPERIMEN DAN PEMBAHASAN

4.1.	Pengaruh Kuat Tekan Beton (f_c')	31
4.2.	Pengaruh Spasi Tulangan Lateral	35
4.3.	Pengaruh Konfigurasi Tulangan Lateral	40
4.4.	Validasi Antara Model – Model Kekangan dengan Hasil Eksperimen..	42
4.4.1.	Perbandingan untuk Beton Mutu Rendah Spasi 50 mm	42
4.4.2.	Perbandingan untuk Beton Mutu Menengah Spasi 50 mm	45
4.4.3.	Perbandingan untuk Beton Mutu Menengah Spasi 100 mm	48
4.4.4.	Perbandingan untuk Beton Mutu Tinggi Spasi 50 mm	51
4.4.5.	Perbandingan untuk Beton Mutu Tinggi Spasi 100 mm	54

BAB. V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1.	Kesimpulan	57
5.2.	Saran – Saran	58

DAFTAR PUSTAKA	59
-----------------------------	----

LAMPIRAN

A.	Contoh Perhitungan Mix Desain	62
B.	Foto – Foto Hasil Eksperimental	64

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komposisi campuran beton	24
Tabel 3.2	Desain tulangan lateral kolom	26
Tabel 4.1	Hasil pengujian kolom	30

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Bagan alir (<i>flow chart</i>) program penelitian	4
Gambar 2.1	Kurva tegangan – regangan beton mutu normal dan beton mutu tinggi [Collins & Mitchell (1991)].	7
Gambar 2.2	Mekanisme kekangan pada beton secara detail [CEB-FIP (1990)].	8
Gambar 2.3	Mekanisme tegangan lateral pada beton penampang bulat [CEB – FIP (1990)].	9
Gambar 2.4	Hubungan tegangan – regangan beton terkekang dan beton tidak terkekang [Razvi & Saatcioglu, 1992]	12
Gambar 2.5	Pengekangan dengan tulangan lateral persegi dan spiral	16
Gambar 2.6	Penampang efektif inti beton	17
Gambar 2.7	Model tegangan – regangan oleh Imran dkk	18
Gambar 2.8	Model Cusson dan Paultre (1993)	20
Gambar 2.9	Model tegangan – regangan diusulkan Antonius, dkk (2001)	22
Gambar 3.1	Kurva tegangan – regangan baja	25
Gambar 3.2	Konfigurasi tulangan lateral	25
Gambar 3.3	Rencana pengujian dan teknik pengujian kolom konsentris	27
Gambar 3.4	Penempatan LVDT untuk mengukur regangan	28
Gambar 4.1	Grafik tegangan – regangan pembebanan secara monotonik	31
Gambar 4.2	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral A pembebanan secara monotonik.	32
Gambar 4.3	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral B pembebanan secara monotonik	33
Gambar 4.4	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral C pembebanan secara monotonik	33
Gambar 4.5	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral D pembebanan secara monotonik	34
Gambar 4.6	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral A pembebanan secara monotonik	35

Gambar 4.7	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral A pembebanan secara monotonik	36
Gambar 4.8	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral B pembebanan secara monotonik	36
Gambar 4.9	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral B pembebanan secara monotonik	37
Gambar 4.10	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral C pembebanan secara monotonik	37
Gambar 4.11	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral C pembebanan secara monotonik	38
Gambar 4.12	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral D pembebanan secara monotonik	38
Gambar 4.13	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral D pembebanan secara monotonik	39
Gambar 4.14	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral A, B, C, D pembebanan secara monotonik ($f_c' = 43,50$ MPa, spasi 50 mm)	40
Gambar 4.15	Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral A, B, C, D pembebanan secara monotonik ($f_c' = 66,60$ MPa, spasi 50 mm)	41
Gambar 4.16	Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen AL5	42
Gambar 4.17	Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen BL5	43
Gambar 4.18	Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen CL5	43
Gambar 4.19	Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen DL5	44
Gambar 4.20	Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen AM5	45
Gambar 4.21	Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen BM5	46
Gambar 4.22	Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen CM5	46
Gambar 4.23	Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen DM5	47

Gambar 4.24 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen AM10	48
Gambar 4.25 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen BM10	49
Gambar 4. 26 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen CM10	49
Gambar 4.27 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen DM10	50
Gambar 4.28 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen AH5	51
Gambar 4.29 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen BH5	52
Gambar 4.30 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen CH5	52
Gambar 4.31 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen DH5	53
Gambar 4.32 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen AH10	54
Gambar 4.33 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen BH10	55
Gambar 4.34 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen CH10	55
Gambar 4.35 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen DH10	56

DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH

ACI	: American Concrete Institute
CEB	: Committee Europe du Beton
CSA	: Canadian Standard Association
SNI	: Standar Nasional Indonesia
SCL	: spesimen control low
SCM	: spesimen control middle
SCH	: spesimen control high
AL5	: konfigurasi tulangan lateral A, spesimen low dan jarak spasi 50 mm.
AM5	: konfigurasi tulangan lateral A, spesimen middle dan jarak spasi 50 mm.
AM10	: konfigurasi tulangan lateral A, spesimen middle dan jarak spasi 100 mm.
AH5	: konfigurasi tulangan lateral A, spesimen high dan jarak spasi 50 mm.
AH10	: konfigurasi tulangan lateral A, spesimen high dan jarak spasi 100 mm.
BL5	: konfigurasi tulangan lateral B, spesimen low dan jarak spasi 50 mm.
BM5	: konfigurasi tulangan lateral B, spesimen middle dan jarak spasi 50 mm.
BM10	: konfigurasi tulangan lateral B, spesimen middle dan jarak spasi 10 mm.
BH5	: konfigurasi tulangan lateral B, spesimen high dan jarak spasi 50 mm.
BH10	: konfigurasi tulangan lateral B, spesimen high dan jarak spasi 100 mm.
CL5	: konfigurasi tulangan lateral C, spesimen low dan jarak spasi 50 mm.
CM5	: konfigurasi tulangan lateral C, spesimen middle dan jarak spasi 50 mm.
CM10	: konfigurasi tulangan lateral C, spesimen middle dan jarak spasi 100 mm.
CH5	: konfigurasi tulangan lateral C, spesimen high dan jarak spasi 50 mm.
CH10	: konfigurasi tulangan lateral C, spesimen high dan jarak spasi 100 mm.
DL5	: konfigurasi tulangan lateral D, spesimen low dan jarak spasi 50 mm.
DM5	: konfigurasi tulangan lateral D, spesimen middle dan jarak spasi 50 mm.
DM10	: konfigurasi tulangan lateral D, spesimen middle dan jarak spasi 100 mm.
DH5	: konfigurasi tulangan lateral D, spesimen high dan jarak spasi 50 mm.
DH10	: konfigurasi tulangan lateral D, spesimen high dan jarak spasi 100 mm.

DAFTAR NOTASI

A_{core}	: luas penampang inti (<i>core</i>) kolom, diukur dari tengah – tengah tulangan lateral
A_c	: luas efektif penampang daerah terkekang
A_g	: luas total penampang kolom
A_s	: luas penampang tulangan longitudinal
A_{sh}	: luas total tulangan lateral
c	: koefisien gesekan pada kriteria Mohr- Coulomb
d_c	: diameter penampang inti kolom, diukur dari tengah – tengah diameter sengkang
δ	: defleksi kolom arah lateral
E_c	: modulus elastisitas beton
e	: eksentrisitas beban pada pengujian kolom
ϵ_{c50c}	: regangan beton terkekang pada saat tegangan turun sampai 50% tegangan maksimum
ϵ_{50}	: regangan beton tidak terkekang pada saat tegangan beton turun sampai 50% tegangan maksimum
ϵ_{cc}'	: regangan puncak beton terkekang
ϵ_{85}	: regangan beton tanpa kekangan setelah respon puncak pada saat 85% dari tegangan puncak beton tanpa kekangan (<i>Unconfined</i>)
ϵ_{85c}	: regangan beton terkekang setelah respon puncak pada saat 85% dari tegangan puncak beton terkekang (<i>Confined</i>)
σ_u	: tegangan ultimate baja
σ_y	: tegangan leleh (<i>yield</i>) baja
ϵ_u	: regangan ultimate baja
ϵ_y	: regangan leleh (<i>yield</i>) baja
f_2	: tegangan lateral
f_{lat}	: tegangan lateral
f_c'	: kuat tekan beton
f_{cc}'	: tegangan maksimum beton terkekang
f_{co}'	: tegangan maksimum beton tidak terkekang
f_r	: tegangan sisa (<i>residual stress</i>)
f_s	: tegangan tulangan lateral pada saat respon maksimum
f_y	: tegangan tulangan leleh
K	: peningkatan kekuatan beton terkekang
k_d	: jarak antara serat tertekan sampai garis netral penampang
k_c	: koefisien efektifitas kekangan

- m : rasio antara tegangan tekan maksimum terhadap tegangan tarik maksimum
 μ : daktilitas beton terkekang (diukur terhadap regangan)
 μ_ϕ : daktilitas kurvatur (*curvature ductility*)
 P_o : kekuatan aksial kolom
 P_{oc} : kapasitas kekuatan kolom beton (tanpa tulangan longitudinal) berdasarkan luas total penampang
 P_{occ} : kapasitas kekuatan kolom beton (tanpa tulangan longitudinal) berdasarkan luas inti penampang
 ρ : rasio tulangan longitudinal
 ρ_s : rasio tulangan lateral
 ρ_{cc} : rasio tulangan longitudinal terhadap inti kolom
 $\sum w^2$: jumlah kwadrat jarak bersih antara tulangan longitudinal yang berdampingan
 σ_1 : tegangan utama pada arah lateral
 σ_3 : tegangan utama pada arah aksial
 s : spasi tulangan lateral, yang diukur dari pusat ke pusat tulangan tersebut
 s' : spasi bersih antara tulangan lateral
 τ : tegangan geser

MODEL – MODEL KEKANGAN (BAB II.5)

Model Cusson

- A_{shx} : luas tulangan lateral dalam arah x
 A_{shy} : luas tulangan lateral dalam arah y
 c_x : lebar inti beton dalam arah x
 c_y : lebar inti beton dalam arah y
 ϵ_{co} : regangan maksimum beton tidak terkekang
 ϵ_{cc} : regangan maksimum beton terkekang
 f_{co} : tegangan puncak beton tidak terkekang
 f_{cc} : tegangan puncak beton terkekang
 f_{le} : tegangan lateral efektif
 k_1 : faktor kelengkungan grafik setelah respon puncak
 k_2 : faktor kurvatur grafik setelah respon puncak
 ρ_s : rasio tulangan longitudinal terhadap inti beton
 $\sum w_i^2$: jumlah kwadrat dari semua jarak bersih antara dua tulangan longitudinal yang berdekatan
 s : spasi tulangan lateral dari pusat ke pusat
 s' : spasi bersih *ties*

Model Imran

- ϵ : regangan beton
- ϵ_c : regangan puncak beton tidak terkekang
- ϵ_{cc} : regangan puncak beton terkekang
- $\epsilon_{0,85}^c$: regangan pada tegangan beton terkekang sebesar $0,85 f_{cc}'$
- $\epsilon_{0,85}^u$: regangan pada tegangan beton tidak terkekang sebesar $0,85 f_c'$
- f_c' : kuat tekan beton
- f_{cc}' : tegangan puncak beton terkekang
- f_2 : tegangan lateral
- f_r : tegangan sisa (*residual stress*)
- K : peningkatan kekuatan beton terkekang
- z : faktor kemiringan kurva setelah respon puncak pada beton terkekang

Model Antonius

- d_c : jarak inti diukur dari pusat ke pusat
- E : modulus elastisitas beton
- f_{co}' : tegangan puncak beton tidak terkekang
- f_c' : kuat tekan beton
- f_{cc}' : tegangan puncak beton terkekang
- $f_{lat} = f_2$: tegangan lateral
- f_y : tegangan tulangan leleh
- f_r : tegangan sisa (*residual stress*)
- K : peningkatan kekuatan beton terkekang
- k_e : koefisien efektifitas kekangan
- s : spasi tulangan lateral dari pusat ke pusat
- $\epsilon_{0,85c}$: regangan pada tegangan beton terkekang sebesar $0,85 f_{cc}'$
- ϵ_{co}' : regangan puncak beton tidak terkekang
- ϵ_{cc}' : regangan puncak beton terkekang
- ρ_s : rasio tulangan longitudinal terhadap inti beton
- ρ : rasio tulangan longitudinal
- ρ_{cc} : rasio tulangan longitudinal terhadap inti beton

DAFTAR LAMPIRAN

A. CONTOH PERHITUNGAN CAMPURAN BETON

B. GAMBAR – GAMBAR HASIL EKSPERIMENTAL

- Gambar B 1. Campuran beton menggunakan tambahan abu terbang (*Fly Ash*)
- Gambar B 2. Benda uji kolom pendek (*Short column*)
- Gambar B 3. Daerah uji (*Test region*) 200 mm terletak ditengah – tengah kolom.
- Gambar B 4. Daerah pengujian (*Test region*) dipasang LVDT arah vertikal.
- Gambar B 5. Pemasangan *strain gauge* pada tulangan lateral.
- Gambar B 6. Kabel – kabel LVDT dihubungkan ke *Data logger*.
- Gambar B 7. Mesin uji UTM (*Universal Testing Machine*) kapasitas efektif 1200 kN.
- Gambar B 8. Pengujian spesimen AM5 pada daerah pengujian (*Test Region*) telah hancur (tidak efektif)/diberhentikan.
- Gambar B 9. Mesin uji tekan (UTM) sedang bekerja menguji spesimen AM10.
- Gambar B10. Hasil pengujian spesimen AM5, AM10 dan spesimen lainnya pada daerah pengujian (*Test region*) telah hancur.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada dekade 90-an, di Indonesia telah mulai dilakukan penelitian secara intensif mengenai perilaku mekanis material beton mutu tinggi. Beberapa sifat beton mutu tinggi diketahui memiliki sifat yang tangguh dibandingkan dengan beton mutu normal, diantaranya pada beton mutu tinggi mempunyai kekakuan dan ketegaran retak yang lebih tinggi serta sifat durabilitas yang lebih baik [ACI – ASCE,1997]. Hal ini menjadikan beton mutu tinggi mempunyai prospek penggunaan yang sangat baik di masa mendatang. Keuntungan yang diperoleh dengan digunakannya bahan struktur yang terbuat dari beton mutu tinggi ini diantaranya adalah dimungkinkannya penggunaan balok dengan ukuran bentang yang lebih panjang, atau selain itu dapat direduksinya dimensi kolom. Peraturan beton Indonesia (SNI '92), persamaan desain yang digunakan pada umumnya masih berdasarkan hasil pengujian untuk beton mutu normal.

Beton mutu tinggi masih perlu diselidiki lebih lanjut aplikasi berdasarkan ketentuan perencanaan tersebut dalam penggunaan pada komponen struktur yang terbuat dari beton mutu tinggi. Berdasarkan perilaku mekanis yang dimilikinya, seperti kuat tekan yang lebih baik dibanding beton mutu normal, beton mutu tinggi sangat cocok diaplikasikan pada struktur beton prategang maupun komponen struktur yang dominan menahan beban aksial seperti kolom. Studi mengenai perilaku kolom beton yang dipasang tulangan lateral di Indonesia telah dikembangkan pada pertengahan dasawarsa 90-an [Antonius dkk, 1999]. Kenyataan dilapangan kolom yang berpenampang persegi lebih banyak dipakai daripada penampang bulat. Perbedaan utama antara penampang bulat dan penampang persegi adalah “konfigurasi tulangan”, yang merupakan parameter pada penampang persegi tidak terdapat pada penampang bulat.

Parameter konfigurasi tulangan lateral memegang peranan yang signifikan dalam mengontrol deformasi kolom, terlebih pada struktur yang menahan beban gempa [Moehle & Cavanagh, 1985]. Geometri zona terkekang yang terbentuk kadangkala mengakibatkan efektifitas kekangan akan menjadi salah estimasi, apabila konfigurasi tulangan lateral tidak diperhitungkan. Hal ini dapat menimbulkan ketidakpastian dalam desain struktur.

1.2. Rumusan Masalah

Dalam peraturan beton Indonesia (SNI'92) pasal 3.3.9 disebutkan bahwa ketentuan pemasangan tulangan lateral minimum pada kolom adalah sebagai berikut :

$$\rho_s = 0,45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_y} \quad (1.1)$$

dimana :

- ρ_s = rasio tulangan lateral
- A_g = luas penampang kolom total
- A_c = luas penampang inti kolom
- f_c' = kuat tekan beton (MPa)
- f_y = tegangan leleh tulangan lateral (≤ 400 MPa)

Persamaan (1.1) tersebut diturunkan berdasarkan filosofi desain bahwa apabila terjadi beban yang cukup besar setelah selimut beton terlepas maka tulangan lateral harus dapat efektif melakukan pengekangan terhadap inti beton sehingga terjadi peningkatan kekuatan dan daktilitas kolom [MacGregor, 1997].

Persamaan (1.1) diturunkan untuk kolom beton mutu normal sedangkan untuk beton mutu tinggi hasil persamaan tersebut masih perlu diselidiki lebih lanjut efektifitasnya. Hal ini disebabkan karena ada perbedaan yang signifikan antara perilaku mekanis beton mutu normal dan mutu tinggi (ACI – ASCE, 1997).

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku kekuatan dan daktilitas struktur kolom beton penampang persegi. Efektifitas tulangan lateral dalam mengontrol deformasi kolom adalah kajian utama dalam studi yang dilakukan. Beberapa parameter desain seperti kuat tekan beton (f_c'), rasio tulangan lateral dan konfigurasi tulangan lateral merupakan faktor – faktor yang mempengaruhi kekuatan dan daktilitas kolom.

Bahan pembentuk beton seperti semen, pasir dan agregat kasar menggunakan bahan yang tersedia di pasaran. Baja tulangan yang digunakan untuk tulangan lateral disesuaikan dengan yang biasa digunakan di lapangan.

Selanjutnya tujuan penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi kuat tekan beton (f_c') terhadap kekuatan dan daktilitas kolom

2. Mengetahui variasi rasio tulangan lateral (ρ_s) yang dipasang terhadap kekuatan dan daktilitas kolom.
3. Mengetahui efek konfigurasi tulangan lateral yang dipasang terhadap kekuatan dan daktilitas kolom.

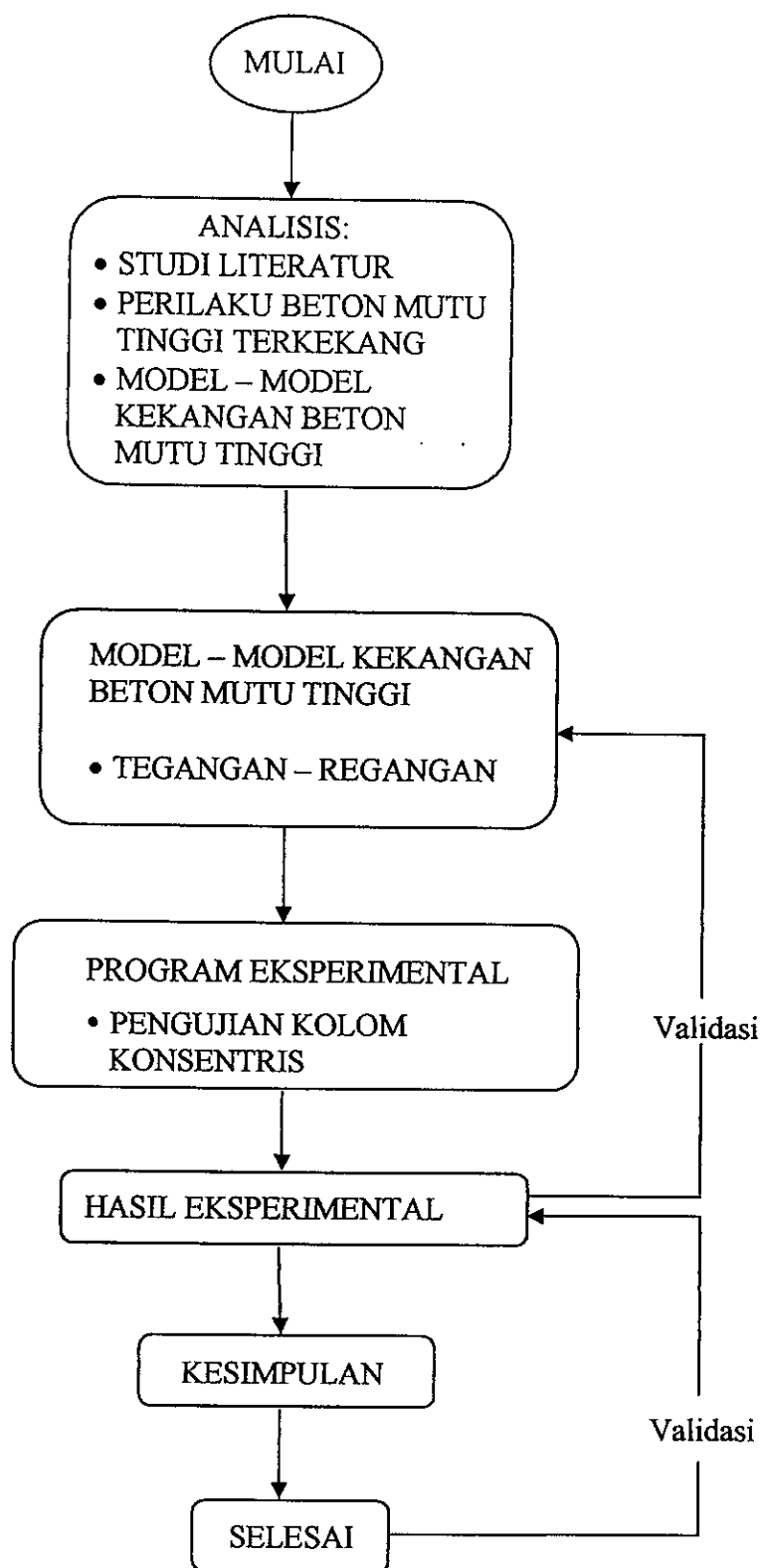
1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian dibatasi sebagai berikut:

1. Kolom yang ditinjau adalah kolom pendek (*short column*); angka kelangsingan $\lambda < 22$
2. Penampang kolom yang ditinjau adalah persegi
3. Kuat tekan beton (f'_c) yang digunakan antara 30 dan 75 MPa.
4. Karakteristik tulangan lateral yang ditinjau adalah rasio tulangan lateral (ρ_s) dan spasi.
5. Pengujian pada kolom adalah uji tekan secara *monotonic*.
6. Pengujian kolom adalah terhadap beban konsentris.

1.5. Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mulai melakukan studi literatur diantaranya perilaku beton mutu tinggi terkekang dan model – model kekangan beton mutu tinggi, dilanjutkan dengan melaksanakan eksperimental pengujian kolom secara konsentris. Hasil eksperimen kemudian dibahas sesuai dengan tujuan penelitian, selain itu dilakukan studi perbandingan terhadap model – model kekangan dengan hasil eksperimen. Bagan alir penelitian terlihat pada gambar 1.1.



Gambar 1.1 Bagan alir program penelitian.

1.6. Sistematika Penulisan

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Menyajikan teori tentang, perilaku mekanik beton terhadap beban uniaksial, perilaku mekanik beton terhadap beban triaksial, perilaku kolom beton terhadap beban aksial konsentris, perilaku tegangan – regangan beton terkekang serta diuraikan pula model – model kekangan beton mutu normal, dan mutu tinggi yang telah dikembangkan.

BAB III : METODOLOGI DAN PROGRAM EKSPERIMEN

Berisi tentang hasil pelaksanaan pengujian kolom secara eksperimental dengan pembebanan konsentris, yang mencakup pemilihan bahan/material, *mix desain*, pengujian kolom, akuisisi data. Selain itu diperlihatkan pula pengolahan data hasil pengujian.

BAB IV : HASIL EKSPERIMENTAL DAN PEMBAHASAN

Menguraikan hasil – hasil pengujian kolom, dan kemudian pembahasan. Pembahasan tersebut meliputi evaluasi terhadap perubahan variabel kekangan terhadap perilaku kekuatan dan daktilitas beton mutu rendah, mutu menengah dan mutu tinggi terkekang yang dianut dalam peraturan beton Indonesia (SNI'92)

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian, dan saran untuk pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perilaku Mekanik Beton Terhadap Beban Uniaksial.

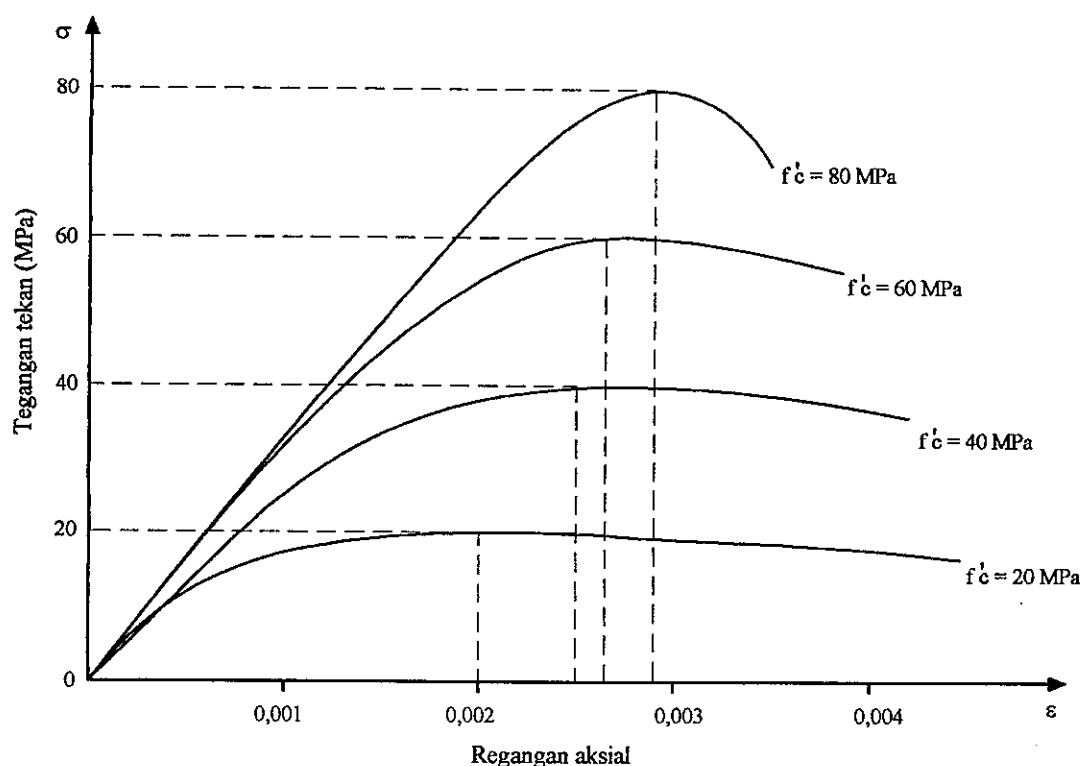
Hingga saat ini kuat tekan beton dapat dibagi kedalam dua kelompok, yaitu beton mutu normal dan beton mutu tinggi. Beton mutu tinggi sering didefinisikan sebagai beton yang mempunyai kepadatan dan ketegaran retak yang tinggi. Definisi kuat tekan beton mutu tinggi di setiap negara berbeda satu sama lain [Diniz & Frangopol (1997)]. Di Australia beton mutu tinggi adalah beton yang mempunyai kuat tekan di atas 50 MPa, sedangkan di Eropa beton mutu tinggi mempunyai kuat tekan beton diatas 60 MPa. ACI menetapkan kuat tekan beton diatas 41 MPa sebagai beton mutu tinggi (ACI 92). Penelitian ini mendefinisikan batas kuat tekan beton mutu tinggi seperti ketentuan ACI, karena masih terbatasnya pengetahuan akan perilaku beton pada mutu di atas 41 MPa tersebut.

Beton mutu tinggi mempunyai perilaku tegangan – regangan terhadap beban uniaksial yang berbeda jika dibandingkan dengan beton mutu normal. Beton mutu tinggi menunjukkan perilaku yang lebih getas [Cusson & Paultre (1993), Razvi & Saatcioglu (1999)]. Pada kurva tegangan – regangan, setelah respon puncak terjadi penurunan tegangan yang relatif lebih cepat pada beton mutu tinggi dibandingkan dengan beton mutu normal, yang mengakibatkan beton mutu tinggi mempunyai daktilitas yang lebih rendah.

Perbedaan perilaku tegangan – regangan ini disebabkan oleh perbedaan pada mekanisme terbentuknya retak. Pada beton normal, retak terjadi pada daerah transisi antara agregat dan pasta, yang menghasilkan permukaan retakan yang lebih kasar. Permukaan retakan yang kasar ini akan memberikan mekanisme pelepasan energi secara bertahap selama terjadi keruntuhan. Inilah yang menyebabkan beton normal lebih daktil, dimana penurunan tegangan setelah respon puncak lebih landai dibandingkan dengan penurunan tegangan beton mutu tinggi.

Pada beton mutu tinggi, retakan dan penjalarannya terjadi pada agregat, yang menghasilkan permukaan retakan yang relatif lebih halus, sehingga gesekan antara permukaan retakan menjadi lebih kecil, yang tidak memungkinkan terjadinya mekanisme untuk melepaskan energi secara bertahap selama terjadi keruntuhan. Terjadinya retakan pada agregat ini karena kekuatan ikatan antara unsur – unsur penyusun beton mutu tinggi relatif sama dengan

kekuatan agregat dan kekuatan pasta semennya, sehingga proses penjalaran retakan akan melalui lintasan yang membutuhkan energi yang terendah.



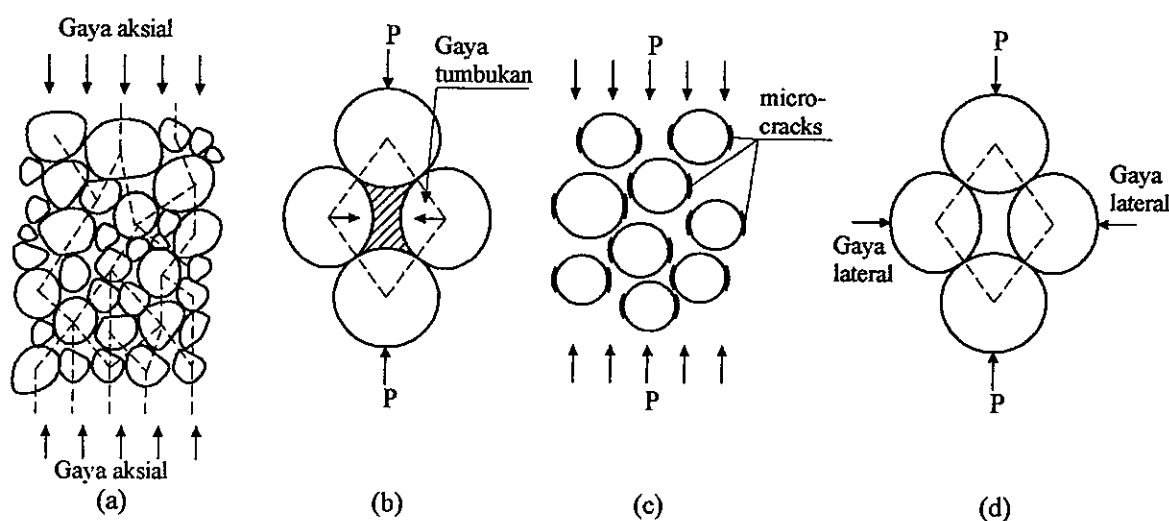
Gambar 2.1 Kurva tegangan - regangan beton mutu normal dan beton mutu tinggi [Collins & Mitchell (1991)].

Gambar 2.1 memperlihatkan perilaku beton mutu tinggi yang mempunyai grafik tegangan – regangan yang lebih linier sebelum puncak dibandingkan dengan beton mutu normal. Pada beton normal, setelah tegangan mencapai 0,3 – 0,4 dari tegangan puncaknya, perilaku tegangan – regangan mulai non linier, yang ditandai oleh mulai terbentuknya retakan pada daerah antara pasta semen dengan agregat. Pada beton mutu tinggi grafik tegangan – regangan masih linier pada regangan yang lebih besar dan modulus elastisitas beton mutu tinggi juga lebih tinggi daripada modulus elastisitas beton mutu normal. Poisson ratio pada beton mutu tinggi lebih rendah daripada Poisson ratio beton mutu normal. Mehta dan Monteiro (1993) menjelaskan bahwa kekuatan ikatan antara mortar, dan antara mortar dengan agregat relatif hampir sama jika dibandingkan dengan kekuatan agregat. Peningkatan kekuatan antara mortar, dan antara mortar dengan agregat ini akan menghasilkan kekuatan puncak yang lebih tinggi dibanding dengan beton mutu normal.

2.2. Perilaku Mekanik Beton Terhadap Beban Triaksial

Perilaku mekanik beton diantaranya sangat bergantung pada kondisi batas yang dikenakan pada beton. Kondisi batas tersebut dapat menimbulkan pembatasan gerakan (*restraint*) terhadap kecenderungan material untuk berdeformasi akibat pembebanan yang dialaminya. Pola keruntuhan beton akibat beban tekan biasanya ditandai oleh adanya pengembangan volume (*volume expansion*) yang tidak terkontrol. Mekanisme *restraint* yang bekerja pada beton dalam proses keruntuhan yang terjadi dapat diperlambat/dikontrol. Salah satu bentuk mekanisme *restraint* tersebut bisa diamati pada beton yang diberi tulangan lateral/pengekang seperti yang umumnya terdapat pada kolom beton bertulang.

Mekanisme terjadinya kekangan pada beton secara detail dapat dilihat pada gambar 2.2. Gaya tekan aksial tekan (P) yang dikenakan pada permukaan beton akan diteruskan sehingga mengenai agregat beton (gambar 2.2a), sehingga mengakibatkan terjadinya tumbukan atau gesekan antar agregat (gambar 2.2b). Akibat tumbukan tersebut terjadi retak – retak mikro (*microcracks*) pada beton (gambar 2.2c). Retak mikro tersebut akan merambat dengan cepat yang kemudian akan menjadi retak makro sampai beton tersebut runtuh. Proses runtuhnya beton tersebut dapat diperlambat jika ada gaya lateral yang berfungsi sebagai pengekang seperti terlihat pada gambar 2.2d



Gambar 2.2 Mekanisme kekangan pada beton secara detail [CEB - FIP (1990)]

Seperti telah disebutkan di atas bahwa pada beton mutu tinggi nilai nisbah Poisson lebih rendah daripada nilai nisbah Poisson beton mutu normal, hal ini berimplikasi pada pengembangan lateral beton mutu tinggi yang tidak secepat pengembangan lateral pada beton

mutu normal. Pada beton mutu tinggi setelah terjadi retak maka proses keruntuhan akan lebih cepat daripada keruntuhan beton mutu normal yang mengakibatkan daktilitas beton mutu tinggi menjadi lebih rendah. Oleh karena itu pemasangan tulangan lateral sangat penting dalam peranannya sebagai pengekang (*confined*) untuk memperlambat proses keruntuhan beton mutu tinggi yang bersifat tiba – tiba.

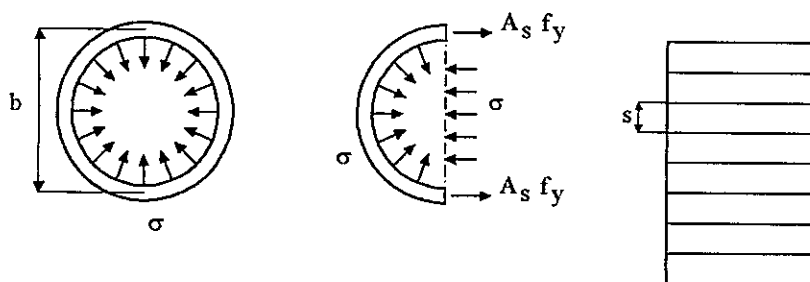
Besarnya tegangan lateral yang diterima tulangan lateral dapat diturunkan berdasarkan prinsip keseimbangan antara gaya lateral dengan gaya tarik tulangan lateral (gambar 2.3). Persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{2A_s f_y}{b.s} \quad (2.1)$$

dimana: A_s = luas penampang tulangan longitudinal

f_y = tegangan tulangan leleh (MPa)

b = diameter penampang beton dihitung dari pusat ke pusat; s = spasi



Gambar 2.3 Mekanisme tegangan lateral pada beton penampang bulat [CEB-FIP (1990)]

Kekangan pada beton dapat dibedakan menjadi 2 macam yaitu kekangan bersifat pasif dan aktif. Kekangan pasif berupa kekangan yang diberi tulangan lateral baik berbentuk spiral maupun persegi atau dengan tabung baja. Pada kekangan pasif tekanan lateral yang diberikan tidak konstan seperti kekangan aktif, tetapi tergantung pada deformasi aksial dari inti beton dan perilaku tegangan – regangan tulangan lateral. Kekangan yang diberikan oleh tulangan lateral akan menghasilkan gaya lateral yang tidak merata dimana bekerja pada inti beton dan besarnya ditentukan oleh rasio tulangan lateral tersebut terhadap inti beton, tegangan leleh, spasi dan konfigurasi tulangan lateral. Sedangkan kekangan aktif kekangan yang diberikan oleh fluida akan menghasilkan gaya lateral yang merata pada seluruh permukaan beton.

Penggunaan kekangan (*confinement*) pada inti beton dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom. Pada percobaan yang dilakukan di laboratorium, pada saat regangan beton mencapai ϵ_{cu} , yaitu regangan pada tegangan puncak untuk beton polos, selimut kolom mulai runtuh dan terlepas dari inti kolom. Kekangan pada inti beton mulai aktif bekerja dengan memberikan tegangan lateral pada inti beton tersebut, yang menahan inti beton dari deformasi lateral yang dapat menyebabkan keruntuhan selama tidak terjadi buckling.

2.3. Perilaku Kolom Beton Terhadap Beban Aksial Konsentris.

Perhitungan kekuatan kolom beton berdasarkan peraturan beton Indonesia (SNI '92) terhadap beban aksial konsentris ditentukan berdasarkan persamaan (2.2)

$$P_o = 0,85 f_c' (A_g - A_c) + A_s f_y \quad (2.2)$$

dimana : f_c' dalam MPa

f_y dalam MPa

Peraturan beton Kanada (CSA'94) juga menggunakan persamaan (2.2) tersebut untuk menghitung kapasitas kolom beton, kecuali faktor 0,85 dikoreksi menjadi fungsi dari f_c' sebagai berikut :

$$\alpha_1 = (0,85 - 0,0015 f_c') \geq 0,67 \quad (2.3)$$

dimana : f_c' dalam MPa

f_y dalam MPa

Secara umum kalkulasi kekuatan berdasarkan CSA tersebut menghasilkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai yang dihasilkan dari perhitungan peraturan beton Indonesia (SNI'92), apabila mutu beton yang digunakan meningkat. Peraturan CSA menganggap bahwa semakin tinggi mutu beton yang digunakan maka kapasitas aksial kolom akan lebih cepat berkurang, sebagai akibat dari terjadinya *premature cover spalling*.

Agar kinerja kekuatan kolom setelah selimut beton terlepas tetap baik atau bahkan meningkat, peraturan beton Indonesia (SNI'92) pasal 3.3.9 menentukan tulangan lateral minimum yang harus dipasang pada kolom, yaitu:

Untuk tulangan lateral berupa spiral :

$$\rho_s \geq 0,45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_y} \quad (2.4)$$

$$\rho_s \geq 0,12 \frac{f_c'}{f_y} \quad (2.5)$$

Untuk tulangan lateral kolom persegi :

$$A_{sh} \geq 0,30 \left(s.d_c \frac{f_c'}{f_y} \right) \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (2.6)$$

$$A_{sh} \geq 0,12.s.d_c \frac{f_c'}{f_y} \quad (2.7)$$

Peraturan beton Indonesia (SNI'92) dan ACI 318M-99 menentukan nilai f_y dalam persamaan diatas tidak lebih dari 400 MPa.

Persamaan (2.4) dan (2.6) diatas digunakan untuk desain tulangan lateral kolom dengan beban statik, sedangkan persamaan (2.5) dan (2.7) digunakan untuk perencanaan kolom terhadap beban seismik.

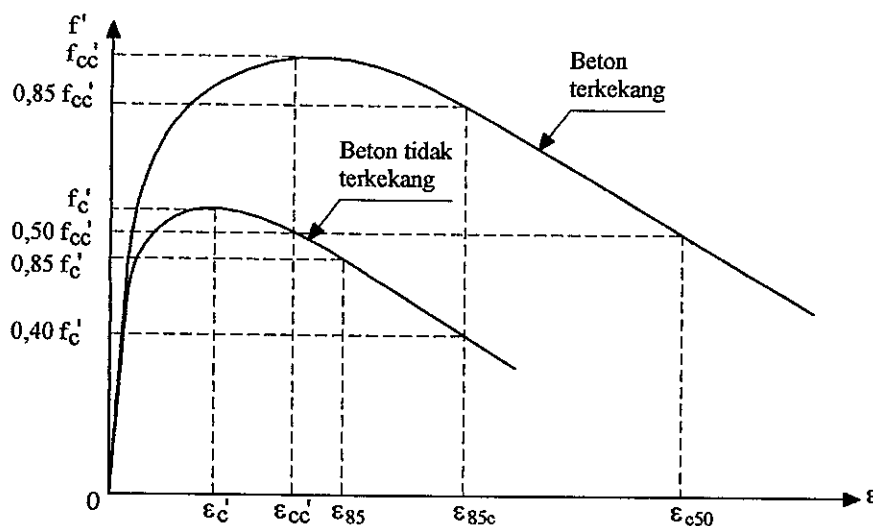
Filosofi desain tulangan lateral berdasarkan SNI '92 diatas yang mengutamakan pemeliharaan kekuatan kolom setelah selimut beton terlepas tidak secara langsung menyatakan daktilitas penampang kolom beton bertulang terhadap kombinasi beban aksial dan lentur.

2.4. Perilaku Tegangan – Regangan Beton Terkekang

Perilaku tulangan lateral dalam kolom akan mempengaruhi hubungan tegangan – regangan beton, dimana bentuk hubungan tersebut dipengaruhi oleh beberapa variabel, terutama kuat tekan beton, rasio tulangan lateral terhadap volume inti beton (*concrete core*), tegangan leleh tulangan lateral, dan spasi tulangan lateral. Selain itu tidak kalah pentingnya adalah pengaruh dari tingkat laju pembebanan, karena karakteristik tegangan – regangan beton pada dasarnya memiliki unsur *time – dependent* [Scott dkk. (1982), Dilger dkk. (1988), Azizinamini dkk. (1994)], Saatcioglu & Baingo (1999)].

Tulangan lateral yang dipasang pada kolom dapat berfungsi sebagai kekangan untuk memperlambat pengembangan lateral beton. Pemasangan tulangan lateral pada beton terutama pada struktur kolom dapat meningkatkan kekuatan dan daktilitas, apabila dibandingkan dengan beton tanpa tulangan lateral. Tulangan lateral tersebut sangat berperan dalam mengekang pengembangan lateral yang terjadi akibat beban tekan aksial, mencegah terjadinya *buckling* pada tulangan longitudinal, dan mencegah keruntuhan geser pada kolom. Semakin tinggi beban aksial yang bekerja terhadap kolom, semakin banyak pula tulangan lateral yang diperlukan agar struktur lebih kuat dan daktil.

Gambar 2.4 memperlihatkan bahwa pada tegangan awal, modulus elastisitas beton terkekang dengan beton tidak terkekang hampir sama. Berarti pada tegangan awal tersebut, tulangan lateral belum aktif memberikan tahanan lateral. Deformasi lateral yang disebabkan oleh beban aksial yang bekerja pada beton, mendapatkan tahanan dari ikatan antara partikel beton. Rasio Poisson yang merupakan perbandingan antara deformasi lateral dengan deformasi aksial, antara beton terkekang dengan beton tidak terkekangpun masih sama.



Gambar 2.4 Hubungan tegangan - regangan beton terkekang dan beton tidak terkekang [Razvi & Saatcioglu, 1992]

Pada tegangan sekitar $0,4 f'_c$, perilaku kurva tegangan - regangan beton mulai non - linier. Poisson rasio mengecil, karena deformasi lateral mulai mendapat tahanan dari tulangan lateral. Tingkat tegangan ini ditandai dengan mulai runtuhnya selimut beton dan mempunyai perilaku tegangan - regangan yang berbeda dengan inti beton. Deformasi lateral beton menimbulkan reaksi dari kekangan berupa tahanan lateral. Hal ini dapat meningkatkan kekuatan dan daktilitas beton terkekang dibanding dengan beton tidak terkekang.

Pada grafik beton terkekang juga terlihat bahwa setelah puncak terjadi penurunan tegangan yang lebih landai, artinya mempunyai daktilitas yang lebih besar dibanding dengan beton tidak terkekang. Pola seperti ini disebabkan karena daya dukung inti beton sebagian besar berasal dari tahanan tulangan lateral, sehingga penurunan tegangan beton menyerupai pola tegangan – regangan tulangan lateral yang daktil.

Tegangan puncak dari beton terkekang terlihat terjadi pada regangan yang lebih besar dibandingkan dengan beton tidak terkekang. Setelah tegangan pada regangan puncak, pada beton tidak terkekang mulai terjadi penurunan tegangan. Sebaliknya pada regangan yang sama pada beton terkekang, dengan bertambahnya deformasi aksial terjadi peningkatan kekuatan, yang tergantung dari besarnya tegangan lateral, sampai mencapai tegangan puncak.

Kekangan pada beton juga meningkatkan sisa kekuatan setelah runtuh (*residual strength*). Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada beton mutu tinggi dengan kuat tekan 60 – 120 MPa, Mansur dkk. (1996) melaporkan bahwa untuk beton dengan mutu yang sama, kekangan pada salah satu spesimen meningkatkan kuat sisa beton yang semula 20 MPa, menjadi 40 – 50 MPa. Besarnya kuat sisa ini tidak tergantung pada mutu beton, tetapi dipengaruhi oleh besarnya tegangan tulangan lateral.

Beton mutu tinggi terkekang (*confined HSC*), menunjukkan perilaku yang berbeda apabila dibandingkan dengan beton normal terkekang (*confined NSC*). Untuk rasio tulangan lateral, tulangan longitudinal dan pada penampang yang sama, kekangan akan lebih efektif pada beton normal terkekang. Berarti dapat memberikan peningkatan kekuatan dan daktilitas yang lebih besar dibandingkan dengan beton mutu tinggi.

2.4.1. Mekanisme Keruntuhan Beton Terkekang

Mekanisme keruntuhan pada beton terkekang sangat mempengaruhi perilaku tegangan – regangan setelah puncak. Pengetahuan yang mendalam tentang mekanisme keruntuhan ini dapat memberikan acuan untuk mendesain beton mutu tinggi terkekang secara efektif.

Konig & Simsch (1996) menjelaskan bahwa mekanisme terjadinya keruntuhan pada beton terkekang terbagi dua, yaitu keruntuhan geser dan keruntuhan pemisah. Keruntuhan geser terjadi ketika tegangan geser melebihi tahanan geser. Keruntuhan pemisah terjadi ketika tegangan tarik pada tulangan lateral telah mencapai tegangan lelehnya. Keruntuhan pemisah

ini terjadi juga karena keruntuhan geser tertahan oleh tulangan lateral. Tegangan yang menyebabkan beton runtuh adalah tegangan terkecil antara kedua mekanisme tersebut, karena keruntuhan akan terjadi pada bagian yang mempunyai energi terendah. Keruntuhan geser akan menyebabkan keruntuhan yang getas, sedangkan keruntuhan pemisah akan menghasilkan pola keruntuhan yang lebih daktail.

Setelah puncak, terjadi penurunan kekuatan dengan meningkatnya deformasi beton. Penurunan kekuatan ini, yang merupakan awal dari proses terjadinya keruntuhan, disebabkan oleh interaksi dari fenomena sebagai berikut :

1. Terbukanya kaitan tulangan lateral, sehingga tulangan lateral tidak memberikan tegangan lateral lagi untuk menahan deformasi beton pada arah lateral.
2. Putusnya tulangan lateral, sehingga kekuatan beton menurun dratis.
3. Terjadinya *buckling* pada tulangan longitudinal, yang disebabkan oleh tidak ada tahanan lateral yang cukup dari tulangan lateral, karena putusnya tulangan lateral, terbukanya kaitan tulangan lateral atau jarak tulangan lateral yang terlalu rengang sehingga tidak memberikan tahanan yang cukup untuk menahan tulangan longitudinal, dan segregasi selimut dari inti beton.

2.4.2. Pengaruh Kuat Tekan Beton (f_c')

Hasil – hasil penelitian oleh Ahmad & Shah (1982), Diniz & Frangopol (1997) dan Saatcioglu & Razvi (1998) menyebutkan secara umum, bahwa kekuatan dan daktilitas beton terkekang akan menurun jika kuat tekan beton meningkat. Ahmad & Shah (1982) melakukan penelitian beton terkekang dengan tulangan spiral sebagai tulangan lateralnya. Penelitian dilakukan terhadap silinder ukuran 76 x 152 mm dan 76 x 305 mm yang dibuat dari beton dengan kekuatan antara 20 dan 69 MPa. Pembebanan terhadap benda uji adalah aksial tekan. Semua spesimen yang diteliti tanpa menggunakan tulangan longitudinal. Selanjutnya Ahmad & Shah melakukan evaluasi terhadap efektifitas kekangan yang dinyatakan dalam parameter k_1 dan k_2 sebagai berikut :

$$f_{oc} = f_o + k_1 (f_r)_p \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_{oc} = \varepsilon_o + k_2 (f_r)_p \quad (2.9)$$

dimana :

f_o dan ε_o = tegangan dan regangan puncak pada beton tidak terkekang

f_{oc} dan ε_{oc} = tegangan dan regangan puncak beton terkekang

$(f_r)_p$ = tegangan lateral yang dihitung berdasarkan asumsi bahwa tulangan spiral leleh pada tegangan puncak

Efektifitas k_1 dan k_2 dijadikan parameter untuk mengukur efektifitas kekangan, dimana kekangan pada semua spesimen sama besar. Dari hasil penelitian tersebut, Ahmad & Shah menemukan bahwa efektifitas tulangan spiral (k_1 dan k_2) pada tegangan puncak, akan menurun dengan meningkatnya kekuatan beton. Penemuan lainnya adalah bahwa pada beton mutu tinggi, tulangan spiral ternyata belum leleh pada saat tegangan puncak. Hal ini ditandai oleh menurunnya nilai k_1 dan k_2 pada saat beban puncak maksimum kolom.

Diniz & Frangopol (1997) juga melaporkan menurunnya efektifitas tulangan spiral apabila rasionya tetap tetapi kuat tekan beton meningkat. Diniz & Frangopol melakukan pengujian terhadap 21 kolom bulat dengan diameter 150 mm, dengan kuat tekan beton antara 62 dan 100 MPa. Rasio tulangan lateral bervariasi dari 1,1 % sampai dengan 3,1 %. Diniz mengungkapkan bahwa tidak ada peningkatan daktilitas kolom berarti jika digunakan rasio tulangan lateral hanya 1,1 %. Daktilitas kolom mulai terasa peningkatannya jika digunakan rasio tulangan lateral sebesar 3,1 %.

Saatcioglu & Razvi (1998) melakukan pengujian terhadap kolom persegi ukuran 250 x 250 mm dengan kuat tekan beton antara 81 dan 124 MPa. Studi ini meninjau perubahan kuat tekan beton terhadap peningkatan kekuatan dan daktilitas kolom, sedangkan pemasangan tulangan lateral dan longitudinal sama. Hasil pengujian menunjukkan bahwa meskipun ada kemampuan berdeformasi yang semakin baik dengan meningkatnya kuat tekan beton terhadap kekuatan kolom, efektifitas tulangan lateral sebagai pengekang semakin berkurang. Disimpulkan bahwa untuk kolom beton mutu tinggi diperlukan rasio tulangan lateral yang tinggi pula.

2.4.3. Pengaruh Spasi Tulangan Lateral

Telah diketahui bahwa reduksi spasi tulangan lateral akan meningkatkan efektifitas tulangan pengekang, yang berakibat naiknya kuat tekan kolom pada penampang inti, Nagashima (1992) membandingkan kolom dengan rasio tulangan pengekang yang sama, tetapi bervariasi dalam hal spasinya. Hasil tes menunjukkan bahwa ada peningkatan kekuatan pada penampang inti kolom apabila spasi semakin mengecil akan tetapi tidak ada perubahan dalam hal daktilitas.

2.4.4. Pengaruh Tegangan Leleh Tulangan Lateral

Tekanan lateral yang dilakukan oleh tulangan lateral tidak hanya tergantung pada tegangan leleh tulangan lateralnya, tetapi juga kesamaan/keseragaman ekspansi lateral terhadap kapasitas kekuatan beton tanpa tulangan. Pada beton normal, Muguruma (1979) dan Martinez (1984) menyimpulkan bahwa tulangan lateral biasanya leleh pada saat beban maksimum. Akan tetapi, untuk beton mutu tinggi, Nishiyama (1993) menyebutkan bahwa pada waktu beban maksimum tulangan lateral ternyata belum tentu leleh. Muguruma merekomendasikan penggunaan tulangan lateral mutu tinggi (600 – 800 MPa) untuk digunakan pada beton mutu tinggi. Dengan menggunakan baja tulangan lateral mutu tinggi tersebut, perilaku beton mutu tinggi berubah dari sifat *brittle* menjadi daktail, dimana regangan aksial meningkat dari 1,2 sampai 4 kali, bila dibandingkan dengan penggunaan tulangan baja mutu rendah.

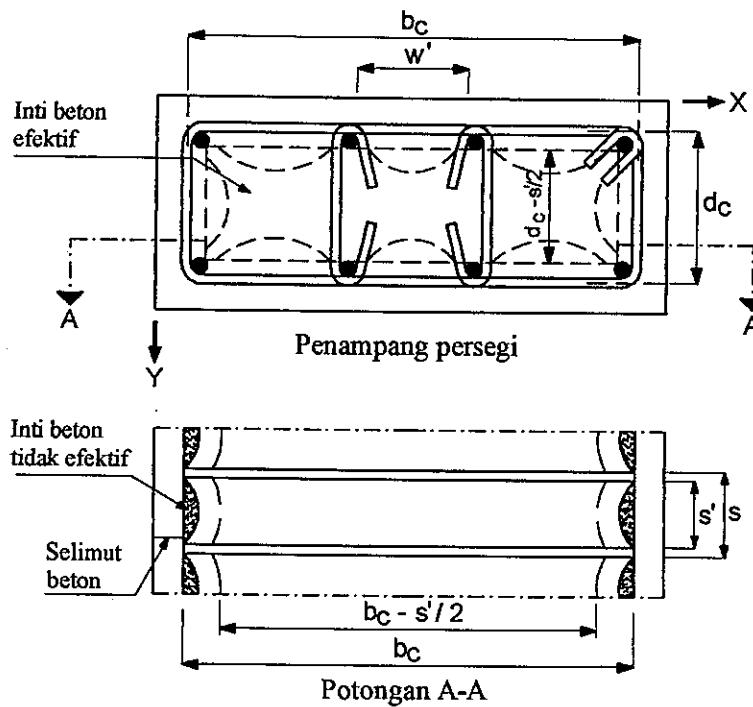
2.4.5. Tegangan Lateral Efektif

Penentuan daerah efektif terkekang pada kekangan pasif sangat penting dilakukan karena mempengaruhi besarnya tegangan lateral aktual yang bekerja pada kolom beton terkekang. Pada umumnya daerah efektif terkekang terkait erat dengan konfigurasi tulangan lateral, konfigurasi tulangan longitudinal dan spasi tulangan lateral. Pada kolom penampang bulat, biasanya daerah yang efektif terkekang adalah mendekati sempurna, karena bentuk dari sengkang yang mengikuti bentuk lingkaran dapat menimbulkan tekanan merata ke sekeliling lingkaran. Tetapi pada penampang persegi daerah efektif terkekang tidak sebaik pada penampang bulat, karena kekangan paling efektif biasanya terjadi pada sudut tulangan *ties*-nya (gambar 2.5). Daerah efektif terkekang penampang persegi akan semakin meningkat apabila sudut bengkokan (*hook*) yang dipasang tulangan longitudinal semakin banyak [Mander (1988), Razvi & Saatcioglu (1998)].



Gambar 2.5 Pengekangan dengan tulangan lateral persegi dan spiral

Sheikh & Uzumeri (1982) mempublikasikan konsep daerah efektif kekangan yang diturunkan dari hasil pengujian kolom beton penampang persegi. Kemudian Mander dkk. (1988) mengadopsi pendekatan yang dilakukan oleh Sheikh & Uzumeri tersebut untuk mengembangkan teori efektifitas kekangan terhadap kolom beton secara lebih luas yang mencakup kolom penampang bulat, bujursangkar dan persegi. persamaan efektifitas kekangan diturunkan berdasarkan gambar 2.6.



Gambar 2.6 Penampang efektif inti beton

Persamaan luas inti beton terkekang penampang persegi sebagai berikut:

$$A_i = \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6} \quad (2.10)$$

$$A_e = \left(b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \quad (2.11)$$

dimana : b_c dan d_c adalah dimensi inti, $b_c \geq d_c$

Persamaan koefisien efektif pengekangan adalah sebagai berikut :

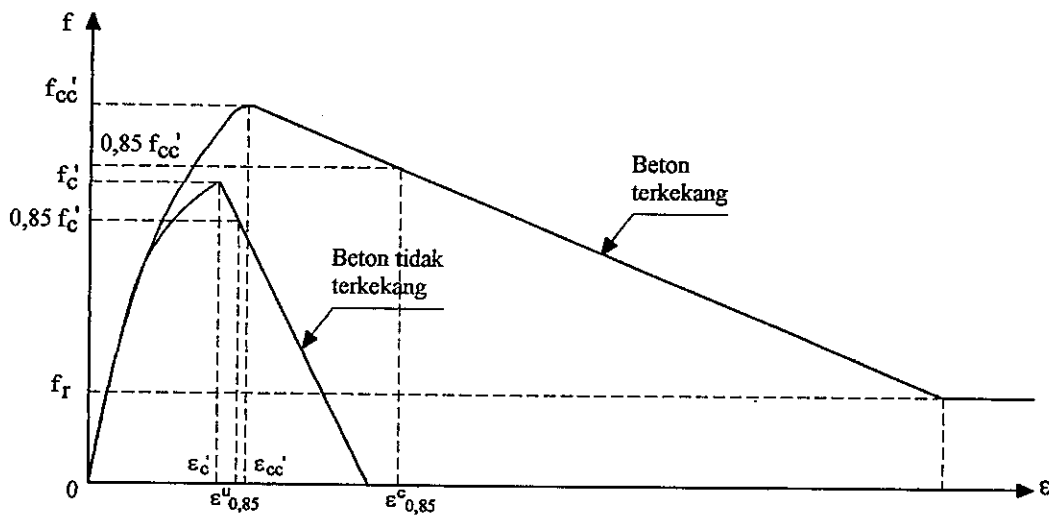
$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6b_c d_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (2.12)$$

2.5. Model – Model kekangan

2.5.1. Model Imran, Moestopo & Suharwanto (1999)

Persamaan tegangan – regangan yang dikembangkan oleh Imran dkk. (1999) adalah berdasarkan hasil pengujian triaksial (kekangan aktif) dengan mutu beton diantara 60 dan 90 MPa. Tingkat beban lateral yang diterapkan bervariasi antara 0 sampai dengan $0,4 f_c'$. Kurva tegangan – regangan dimodelkan seperti gambar 2.7.

Peningkatan kekuatan beton terkekang (K) diturunkan berdasarkan kriteria leleh Mohr-Coulomb. Tegangan lateral efektif yang bekerja berdasarkan pendekatan yang dikembangkan oleh Mander dkk. Kurva tegangan – regangan sebelum respon puncak mengadopsi dari kurva model Hognestad, karena hasil pengujian menunjukkan kemiripan dengan model tersebut.



Gambar 2.7 Model tegangan - regangan oleh Imran dkk.

Persamaan lengkapnya adalah sebagai berikut :

$$f = K \cdot f_c' \left[\frac{2 \cdot \epsilon}{\epsilon_{cc}'} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}'} \right)^2 \right] \quad \text{untuk } \epsilon \leq \epsilon_{cc}' \quad (2.13)$$

$$f = f_{cc}' - Z (\epsilon - \epsilon_{cc}') \quad \text{untuk } \epsilon > \epsilon_{cc}' \text{ \& } f > f_r \quad (2.14)$$

dimana :

$$K = \frac{f_{cc}'}{f_c'} = 1 + 4,4 \frac{f_2}{f_c'} \quad (2.15)$$

$$f_r = 1,45 \cdot f_c' (K - 1) \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{cc}' = K \cdot \varepsilon_c' \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_c' = 0,003 \quad (2.18)$$

$$\varepsilon_{0,85}^u = 0,0035 \quad (2.19)$$

$$\frac{\varepsilon_{0,85}^c}{\varepsilon_{0,85}^u} = e^{\frac{K-1}{3,2-K}} + 3,5(K-1) \quad (2.20)$$

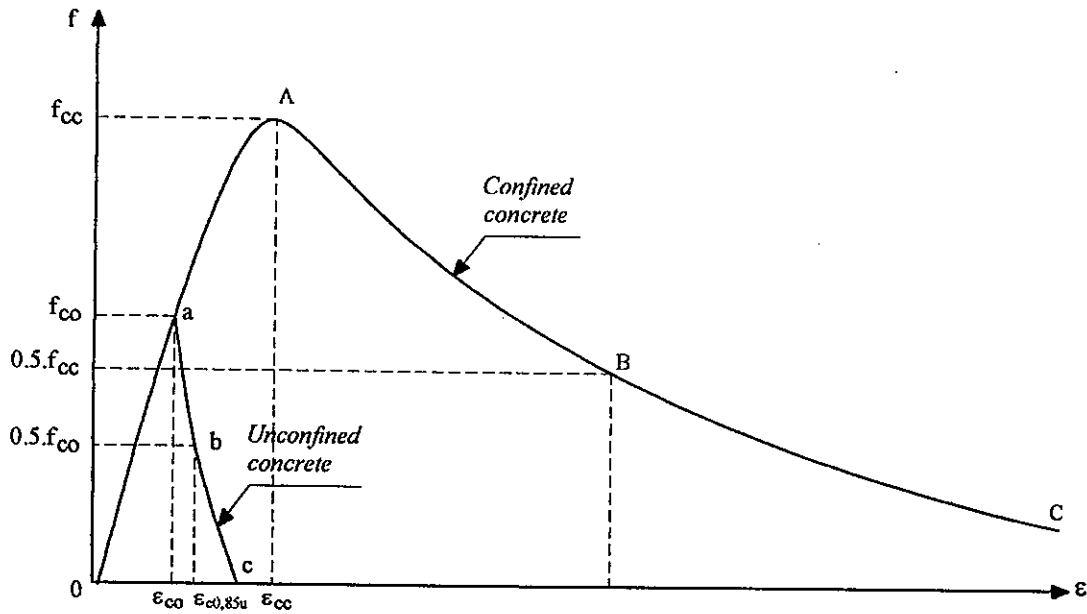
$$Z = \frac{0,15 f_{cc}'}{\varepsilon_{0,85}^c - \varepsilon_{cc}'} \quad (2.21)$$

2.5.2. Model Cusson dan Paultre (1993)

Model Cusson dan Paultre dikembangkan untuk kolom beton terkekang penampang persegi, berdasarkan percobaan pada 50 buah kolom beton mutu tinggi yang dites dengan beban konsentris. Benda uji yang digunakan untuk mengembangkan model tersebut adalah 30 buah kolom beton terkekang dengan ukuran 235x235x1400 mm dan 20 buah kolom beton terkekang dengan ukuran 225x225x715 mm. Spesimen pada kelompok pertama terbuat dari beton dengan kekuatan tekan 60-120 MPa, dengan tulangan lateral yang mempunyai tegangan leleh 400-800 MPa. Spesimen pada kelompok kedua terbuat dari beton dengan kekuatan tekan 60-120 MPa, dan tegangan leleh tulangan lateral bervariasi antara 800-1400 MPa.

Beberapa variabel yang mempengaruhi peningkatan kekuatan dan daktilitas, yang diperhitungkan dalam model tersebut adalah kekuatan tekan beton, kekuatan leleh tulangan longitudinal, konfigurasi dari kekangan, rasio tulangan lateral, spasi tulangan lateral, dan rasio tulangan longitudinal. Penentuan kekuatan dan daktilitas beton terutama dihitung berdasarkan tegangan efektif kekangan, yang merupakan fungsi dari tegangan yang terjadi pada saat tulangan lateral saat beton mencapai kekuatan puncak, dan berdasarkan luas dari inti beton yang efektif terkekang. Luas efektif terkekang ini lebih kecil dari luas inti beton yang dibatasi oleh garis tengah tulangan lateral.

Kurva tegangan – regangan dimodelkan seperti gambar 2.8. Persamaan untuk menentukan grafik tegangan – regangan beton terkekang adalah sebagai berikut :



Gambar 2.8 Model Cusson dan Paultre (1990)

1) Daerah 0A diambil persamaan tegangan – regangan yang diajukan oleh Popovics (1973)

$$f_c = f_{cc} \left[\frac{k \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)}{k - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^k} \right]; \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \quad (2.22)$$

dimana :

$$k = \frac{E_c}{E_c - \left(\frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \right)} \quad (2.23)$$

E_c adalah *modulus elastic* beton

2) Daerah AB

Persamaan tegangan – regangan daerah AB adalah :

$$f_c = f_{cc} \cdot \exp \left[k_1 (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})^{k_2} \right]; \quad \varepsilon_c \geq \varepsilon_{cc} \quad (2.24)$$

$$k_1 = \frac{\ln 0,5}{(\varepsilon_{c50c} - \varepsilon_{cc})^{k_2}} \quad (2.25)$$

$$k_2 = 0,4 + 15 \left(\frac{f_{lc}}{f_{co}} \right)^{1,3} \quad (2.26)$$

dimana f_{lc} adalah tekanan lateral efektif yang dipengaruhi oleh koefisien tekanan lateral efektif (k_e).

Tekanan lateral (f_l) adalah :

$$f_l = \frac{f_h'}{s} \left(\frac{A_{s/lx} + A_{s/ly}}{c_x + c_y} \right) \quad (2.27)$$

Sedangkan koefisien tekanan lateral efektif (k_e) dirumuskan :

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{\sum w_l^2}{6c_x c_y} \right) \left(1 - \frac{s'}{2c_x} \right) \left(1 - \frac{s'}{2c_y} \right)}{(1 - \rho_c)} \quad (2.28)$$

Maka :

$$f_{le} = k_e \cdot f_l \quad (2.29)$$

Nilai tegangan dan regangan terkekang dihitung dengan :

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3 \left(\frac{f_{le}}{f_{co}} \right)^{0,9} \quad (2.30)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} = 0,2 \left(\frac{f_{le}}{f_{co}} \right)^{1,7} \quad (2.31)$$

Tegangan pada tulangan lateral diperoleh dengan menghitung dahulu regangan tulangan lateral pada saat beton mencapai tegangan maksimum, kemudian menghitung tegangan yang sesuai dengan tegangan tersebut pada diagram tegangan – regangan.

Persamaan (2.30) dan (2.31) mempunyai tiga variabel yang belum diketahui yaitu; f_{le} (tegangan efektif kekangan), f_{cc} (tegangan puncak beton terkekang), dan ε_{hcc} (regangan pada saat beton mencapai tegangan puncak). Ketiga variabel tersebut merupakan fungsi dari f_{hcc} , yaitu tegangan pada tulangan lateral pada saat terjadi tegangan maksimum pada beton f_{hcc} yang ditentukan dengan proses iterasi sebagai berikut :

- 1) Hitung tegangan efektif kekangan, f_{le} , dengan asumsi $f_{hcc} = f_{yh}$ pada tulangan lateral.
- 2) Estimasi tegangan dan regangan puncak beton terkekang.
- 3) Estimasi ε_{hcc}
- 4) Hitung tegangan tulangan lateral pada regangan ε_{hcc} , dengan menggunakan diagram tegangan – regangan dari baja yang digunakan.
- 5) Evaluasi kembali nilai f_{le} dengan menggunakan nilai f_{hcc} yang baru.
- 6) Proses tersebut diulang sampai ε_{hcc} konvergen.

Pada waktu menentukan nilai ε_{c50c} , f_{le} dihitung dengan mengasumsikan f_{hcc} sama dengan f_{yh} , karena dalam deformasi yang sedemikian besar tulangan lateral diperkirakan sudah leleh.

2.5.3. Model Antonius, Imran, Suhud, Munaf (2001)

Kurva tegangan – regangan beton terkekang merupakan pengembangan/modifikasi dari model Imran dkk terlihat gambar 2.9. Kurva tegangan – regangan sebelum respon puncak, mengadopsi berdasarkan usulan oleh Popovics (1973).

$$f_c = \frac{f_{cc}' \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}'} \right)^r}{r - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}'} \right)^r} \quad ; \quad \epsilon_c \leq \epsilon_{cc}' \quad (2.32)$$

dimana: $r = \frac{E_c}{E_c - (f_{cc}' / \epsilon_{cc}')}$

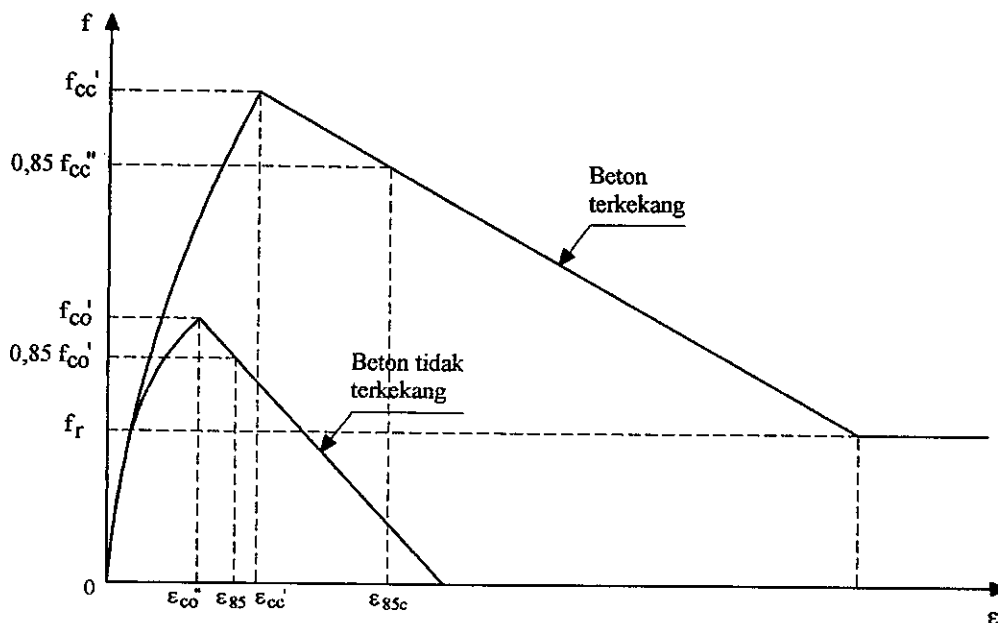
E_c = Modulus Elastisitas Beton

$$E_c = 3400 \sqrt{f_c'} + 4800 \quad ; \quad f_c' \text{ dalam MPa} \quad (2.33)$$

Kurva setelah puncak diasumsikan dengan garis lurus:

$$f_c = f_{cc}' - (\epsilon_c - \epsilon_{cc}') \quad \epsilon_c > \epsilon_{cc}' \quad (2.34)$$

Model beton tidak terkekang diambil dari model Thorenfeld (1987), dengan modifikasi persamaan regangan pada tegangan puncak.



Gambar 2.9 Model yang diusulkan Antonius dkk.

Persamaan lainnya adalah :

$$K = \frac{f_{cc}'}{f_{cc}} = 1 + 3,7 \left(\frac{k_e \cdot f_2}{f_{cc}} \right)^{0,9} \quad (2.35)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} [1,94 (K - 1) + 1] \quad (2.36)$$

$$\varepsilon_{co} = 0,0004 (f_{co}')^{0,45} \quad (2.37)$$

$$\varepsilon_{85c} = \varepsilon_{cc}' + 10^{-5} \cdot E^{3,7K} \quad (2.38)$$

$$f_r = 0,25 f_{cc}' \quad (2.39)$$

Efektifitas Kekangan

Efektifitas kekangan (k_e) menggunakan persamaan model dari Mander dkk (1988). Persamaan penampang bulat nilai k_e adalah :

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right)}{1 - \rho_{cc}} \quad (2.40)$$

Tegangan tulangan lateral saat respon puncak.

Model Antonius dkk telah menghasilkan persamaan tegangan tulangan lateral saat respon puncak, karena berdasarkan hasil eksperimen diperoleh hasil bahwa tulangan lateral cenderung belum leleh apabila kuat tekan beton (f_c') pada kolom meningkat.

$$f_s = E_s \left\{ 0,0004 \cdot \ln \left[\frac{(s/D_c)}{\rho_s \sqrt{f_c'}} \right] + 0,002 \right\} \leq f_y \quad (2.41)$$

dimana : f_s dalam MPa.

f_c' dalam MPa.

f_y dalam MPa.

Daktilitas beton terkekang.

Deformasi beton terkekang pada respon puncak dipengaruhi oleh harga K, yang dihitung pada saat tegangan turun 15 % setelah respon puncak :

$$\varepsilon_{85c} = \varepsilon_{cc}' + 10^{-5} \cdot \exp^{3,7K} \quad (2.42)$$

sedangkan tegangan sisa (f_r) adalah :

$$f_r = 0,25 f_{cc}' \quad (2.43)$$

BAB III

METODOLOGI DAN PROGRAM EKSPERIMEN

3.1. Metode dan Desain

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen di laboratorium. Beberapa variabel desain seperti kuat tekan beton (f_c'), konfigurasi tulangan lateral, dan rasio tulangan lateral akan ditinjau dalam pengujian. Berdasarkan variabel yang mempengaruhi perilaku kekangan pada beton tersebut nantinya dapat diperoleh gambaran mengenai perilaku tegangan – regangan beton terkekang untuk beton mutu normal dan mutu tinggi.

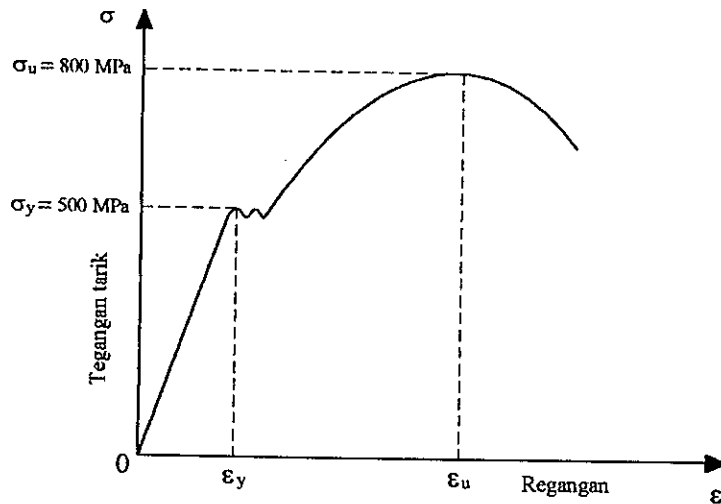
3.2. Material

Kuat tekan beton yang dirancang adalah antara 30 MPa dan 75 MPa. Desain campuran beton menggunakan cara Mehta & Aitcin, yaitu modifikasi dari cara ACI. Komposisi campuran beton dapat dilihat pada tabel 3.1 (terlihat pada lampiran A contoh perhitungan campuran).

Table 3.1 Komposisi campuran beton

Target Kuat tekan (MPa)	Semen Kg/m ³	Abu terbang Kg/m ³	Air Lt/m ³	S.P (1,5%) Lt/m ³	Agregat halus Kg/m ³	Agregat kasar Kg/m ³	w/c
30	381,60	-	202	-	722,90	886,80	0,529
50	420	70,10	160	6,25	646,70	970,25	0,380
70	470	82,75	140	9,25	597,60	1.017,50	0,297

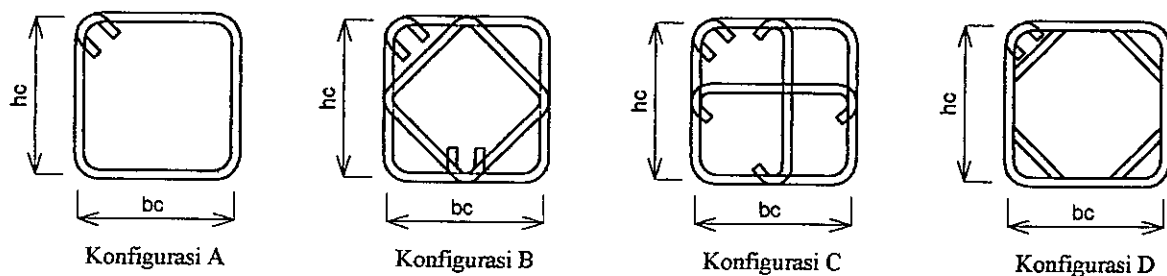
Agregat halus yang digunakan berasal dari Galunggung, sedangkan agregat kasar menggunakan agregat dari lokasi Watugong Semarang, dengan diameter agregat maksimum adalah 14 mm. Semen yang digunakan adalah semen Portland merk Nusantara dengan BJ 3,11. Campuran beton ini juga menggunakan tambahan Abu Terbang (*Fly Ash*) dengan prosentase 1,5% dari berat semen (terlihat pada lampiran B gambar B1). Waktu dilakukan pengecoran agar kelecakannya meningkat maka digunakan *Superplasticizer* (SP) sebesar 1,5% dari berat semen. Diameter tulangan lateral 5,5 mm yang mempunyai tegangan leleh 500 MPa. Kurva tegangan – regangan tulangan lateral terlihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Kurva tegangan - regangan baja.

3.3. Pengujian Kolom

Benda uji kolom pendek (*short column*) yang dikaji adalah sebanyak 23 buah (terlihat pada lampiran B gambar B2). Kolom didesain tanpa selimut beton, dengan lebar kolom 100 mm dan semua kolom tanpa menggunakan tulangan longitudinal. Tinggi kolom adalah 5 (lima) kali lebar kolom dengan angka kelangsingan 20. Angka kelangsingan ini lebih kecil dari angka kelangsingan maksimal berdasarkan ketentuan SNI'92 ($\lambda = 22$), sehingga analisis kolom dapat dianggap sebagai kolom pendek. Daerah uji (*test region*) kolom diambil sebesar 200 mm, yang terletak ditengah – tengah kolom (terlihat pada lampiran B gambar B3). Konfigurasi tulangan lateral kolom terlihat pada gambar 3.2. Desain tulangan lateral kolom terlihat pada tabel 3.2.



Gambar 3.2. Konfigurasi Tulangan Lateral A, B, C dan D

Untuk membedakan kuat tekan beton, penulisan kode spesimen dibagi 3 kelompok yaitu L, M dan H.

dimana : L (low) = beton mutu rendah; target $f'_c = 30$ MPa.
M (medium) = beton mutu menengah; target $f'_c = 50$ MPa.
H (high) = beton mutu tinggi; target $f'_c = 70$ MPa.

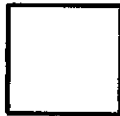

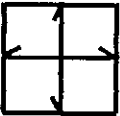
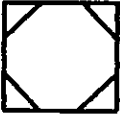
Sebagai Contoh: Spesimen BM10, berarti

B = konfigurasi tulangan lateral B.

M = beton mutu menengah; $f_c' = 50$ MPa.

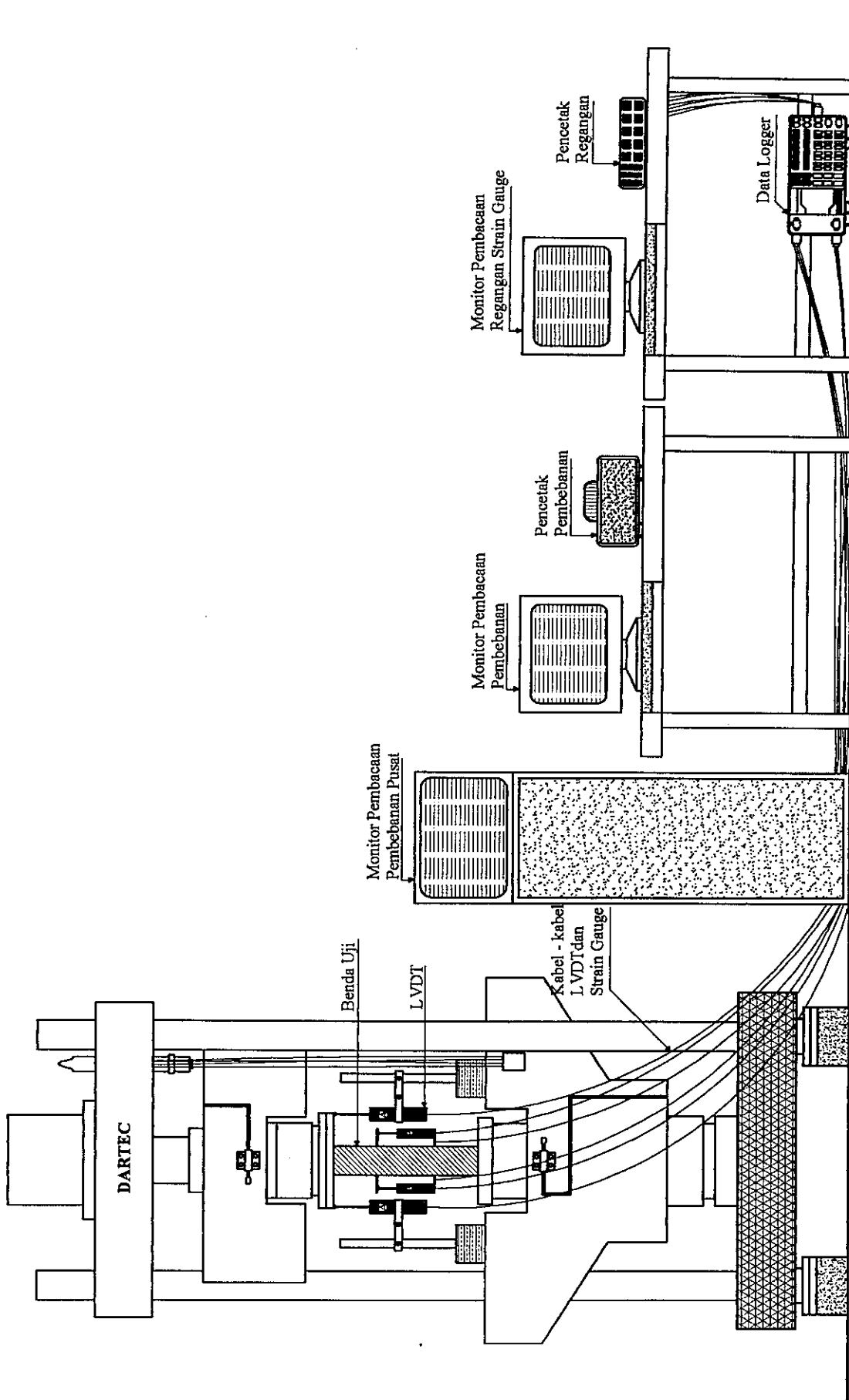
10 = spasi tulangan lateral 100 mm.

Tabel. 3.2 Desain tulangan lateral kolom

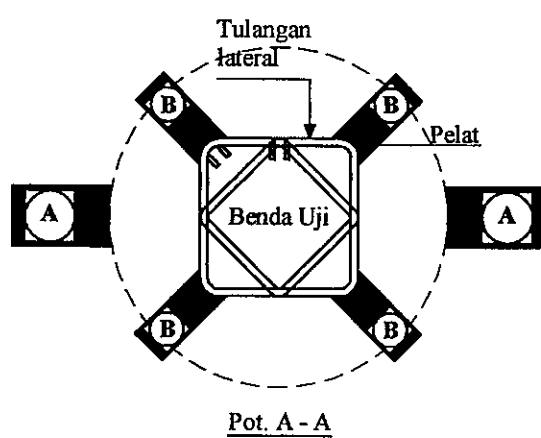
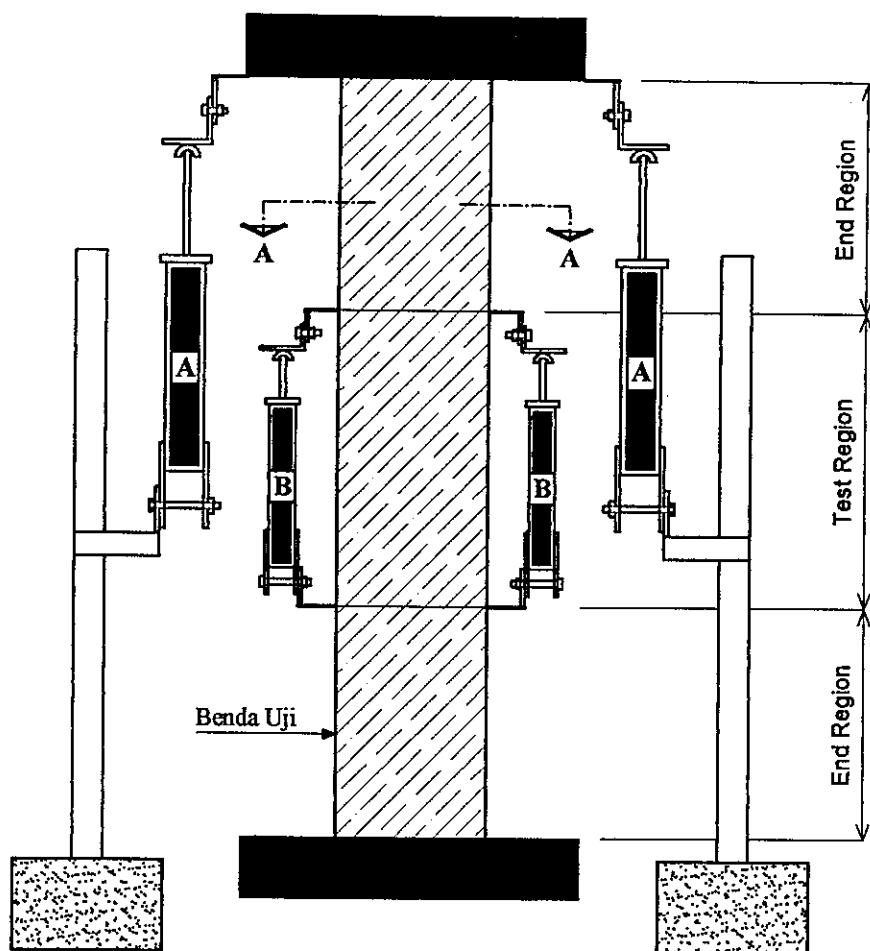
No	Kode Spesimen	f _c ' (MPa)	Tulangan lateral		
			Konfigurasi	Ø - Spasi(mm)	ρ _s (%)
1	SCL	30	-	-	-
2	SCM	50	-	-	-
3	SCH	70	-	-	-
4	AL5	30		5,5 – 50	1,90
5	AM5	50		5,5 – 50	1,90
6	AM10			5,5 – 100	0,95
7	AH5	70		5,5 – 50	1,90
8	AH10			5,5 – 100	0,95
9	BL5	30		5,5 – 50	3,24
10	BM5	50		5,5 – 50	3,24
11	BM10			5,5 – 100	1,62
12	BH5	70		5,5 – 50	1,24
13	BH10			5,5 – 100	1,62
14	CL5	30		5,5 – 50	2,85
15	CM5	50		5,5 – 50	2,85
16	CM10			5,5 – 100	1,43
17	CH5	70		5,5 – 50	2,85
18	CH10			5,5 - 100	1,43
19	DL5	30		5,5 – 50	3,47
20	DM5	50		5,5 – 50	3,47
21	DM10			5,5 – 100	1,73
22	DH5	70		5,5 – 50	3,47
23	DH10			5,5 – 100	1,73

3.4. Prosedur Pembebanan dan Akuisisi Data

Rencana pengujian kolom dan perlengkapan teknis pengujian terlihat pada gambar 3.3 dan gambar 3.4. Pada daerah pengujian (*test region*) dipasang 4 buah LVDT arah vertikal untuk mengukur deformasi kolom pada arah aksial (terlihat pada lampiran B gambar B4), serta pada tulangan lateral dipasang *strain gauge* jenis FLA 3 – 11 (terlihat pada lampiran B gambar B5). Kabel – kabel dari LVDT maupun *strain gauge* selanjutnya dihubungkan ke *Data Logger* (terlihat pada lampiran B gambar B6). Pembebanan pada kolom dilakukan secara langsung dan bertahap dengan sistem *Displacement – Control* dengan kecepatan 0,01 mm/second. Mesin uji tekan adalah UTM (*Universal Testing Machine*) merk DARTEC dengan kapasitas efektif 1200 kN (terlihat pada lampiran B gambar B7).



Gambar 3.3 Rencana pengujian dan teknis
pengujian kolom konsentris



Keterangan :

A (2 Buah) = LVDT 50 mm

B (4 Buah) = LVDT 25 mm

Gambar 3.4 Penempatan LVDT untuk mengukur regangan

3.4.1. Tegangan Beton Terkekang (f_{cc}')

Tegangan beton terkekang diperoleh dengan cara membagi beban maksimum (P_{mak}) dengan luas penampang inti kolom, sebagai berikut :

$$f_{cc}' = \frac{P_{mak}}{A_{core}} \quad (3.1)$$

3.4.2. Tegangan Tulangan Lateral (f_2)

Pengambilan data tulangan lateral pada saat pembebanan adalah berdasarkan data regangan yang diperoleh. Apabila nilai regangan tulangan lateral telah mencapai kelelehannya pada saat respon maksimum, maka penentuan tulangan lateral adalah berdasarkan kondisi *strain hardening* dari data hasil uji tarik baja.

Selanjutnya tegangan tulangan lateral (f_2) yang terjadi ditentukan berdasarkan keseimbangan antara gaya lateral dengan reaksi tulangan lateral yaitu:

$$f_1' = k_e \frac{3.41 A_b \cdot f_{yh}}{s \cdot b_c} \quad (3.2)$$

3.4.3. Regangan Beton

Nilai regangan aksial kolom diperoleh dari harga rata – rata 4 buah LVDT yang dibagi dengan tinggi daerah tes. Beban maksimum yang bekerja pada kolom (P_{mak}) dapat dibaca langsung dari data loger, dimana nilai P_{mak} ini berkorelasi langsung terhadap regangannya.

BAB IV

HASIL EKSPERIMENTAL DAN PEMBAHASAN

Tabel 4.1 memperlihatkan hasil pengujian kolom, yaitu hasil uji kuat tekan beton silinder 15 cm x 30 cm (f_c'), tegangan beton tanpa kekangan/spesimen kontrol (*unconfined*; f_{co}'), data beban maksimum (P_{Mak}), regangan beton pada respon puncak (ϵ_{cc}'), tegangan puncak beton terkekang (f_{cc}') dan peningkatan kekuatan beton terkekang ($K = f_{cc}'/f_{co}'$). Spesimen kontrol (SCL, SCM dan SCH) karena tanpa tulangan lateral, maka tegangan yang terjadi adalah tegangan beton tak terkekang. Spesimen kontrol tersebut bisa juga disebut sebagai kolom beton tidak terkekang (*Unconfined*) atau f_{co}' .

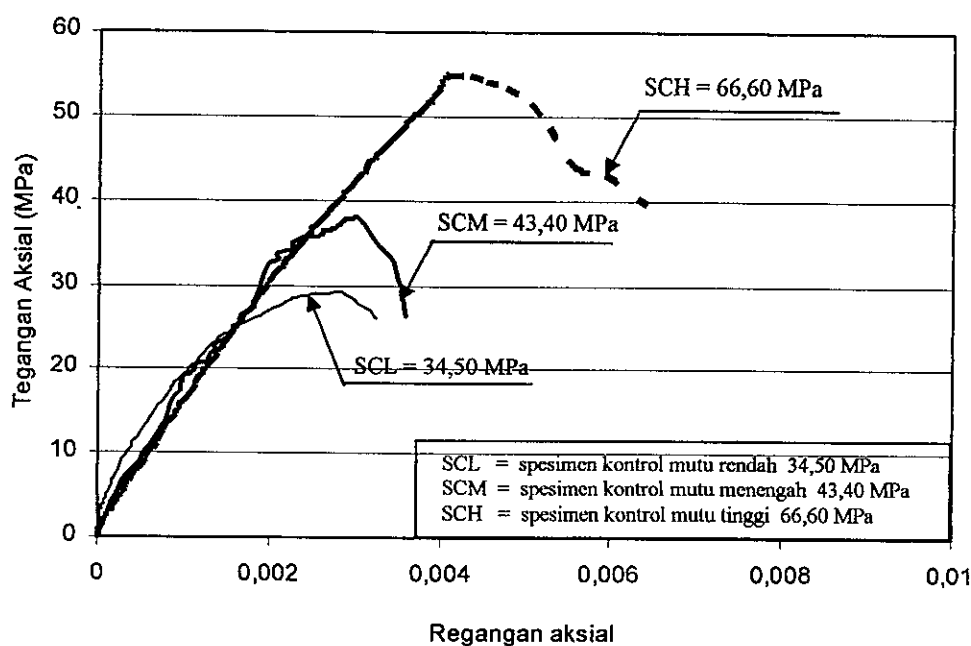
Table 4.1 Hasil pengujian kolom

No	Kode spesimen	f_c' (MPa)	f_{co}' (MPa)	P_{Mak} (kN)	ϵ_{cc}'	f_{cc}' (MPa)	$K = f_{cc}'/f_{co}'$
1.	SCL	34,50	29,142	291,42	0,0028	-	-
2.	SCM	43,40	38,171	271,71	0,0030	-	-
3.	SCH	66,60	54,818	548,18	0,0041	-	-
4.	AL5	34,50	29,142	301,86	0,0041	33,802	1,16
5.	AM5	43,40	38,171	359,02	0,0045	40,203	1,05
6.	AM10	43,40	38,171	326,63	0,0030	36,576	0,96
7.	AH5	66,60	54,818	533,23	0,0078	59,711	1,09
8.	AH10	66,60	54,818	474,43	0,0051	53,126	0,97
9.	BL5	34,50	29,142	300,86	0,0017	33,690	1,16
10.	BM5	43,40	38,171	445,44	0,0057	49,880	1,31
11.	BM10	43,40	38,171	313,72	0,0026	35,130	0,92
12.	BH5	66,60	54,818	631,64	0,0071	70,730	1,29
13.	BH10	66,60	54,818	499,92	0,0039	55,980	1,02
14.	CL5	34,50	29,142	329,26	0,0031	36,870	1,27
15.	CM5	43,40	38,171	375,25	0,0051	42,020	1,10
16.	CM10	43,40	38,171	329,70	0,0034	36,920	0,97
17.	CH5	66,60	54,818	606,63	0,0125	67,930	1,24
18.	CH10	66,60	54,818	496,97	0,0031	55,650	1,02
19.	DL5	34,50	29,142	390,87	0,0071	43,770	1,50
20.	DM5	43,40	38,171	444,01	0,0091	49,720	1,30
21.	DM10	43,40	38,171	300,22	0,0039	33,620	0,88
22.	DH5	66,60	54,818	558,41	0,0107	62,530	1,14
23.	DH10	66,60	54,818	508,33	0,0050	57,000	1,04

Untuk spesimen yang mempunyai nilai $K < 1$ karena selisih masih dibawah 10% dianggap tidak berbeda secara signifikan.

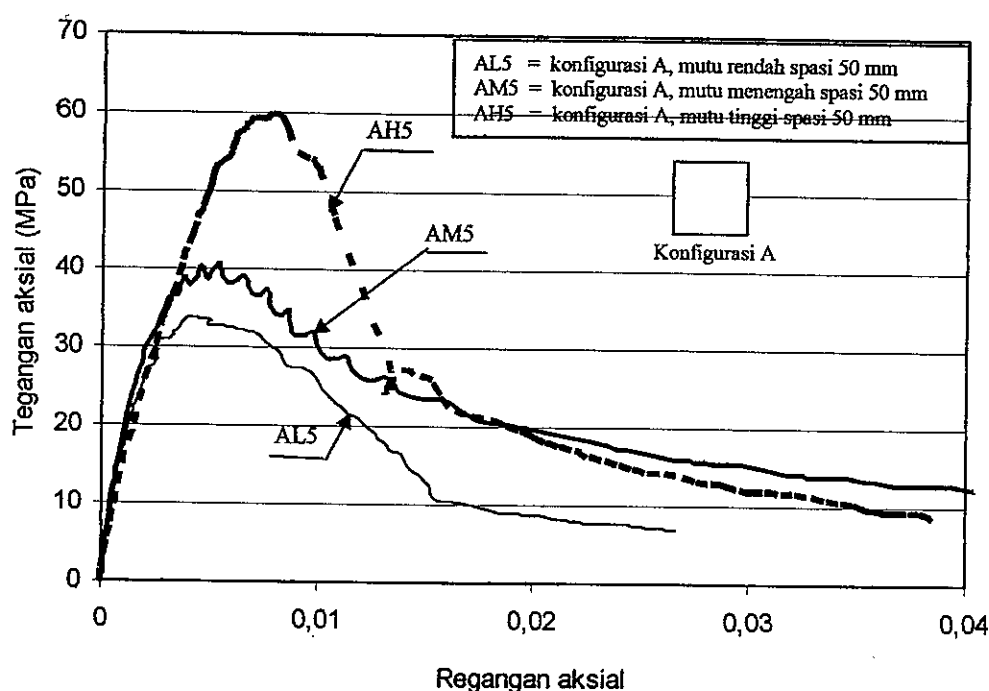
4.1. Pengaruh Kuat Tekan Beton (f'_c)

Gambar 4.1 memperlihatkan kurva tegangan – regangan beton tanpa kekangan (*Unconfined*) dengan variasi kuat tekan beton (f'_c). Berdasarkan gambar 4.1 spesimen SCL memperlihatkan bentuk kurva sebelum respon puncak yang non linear. Perilaku ini kurang lebih sama dengan asumsi yang biasa digunakan untuk kurva tegangan – regangan beton mutu normal ($f'_c < 40$ MPa). Selain itu kurva pasca puncak juga cenderung lebih landai dibandingkan kurva lainnya. Pada gambar 4.1 terlihat pula spesimen SCM memperlihatkan bentuk kurva sebelum respon puncak mendekati linear. Perilaku ini kurang lebih juga sama dengan asumsi yang biasa digunakan untuk kurva tegangan – regangan beton mutu menengah ($40 < f'_c < 60$ MPa). Selain itu kurva pasca puncak juga cenderung lebih curam bila dibandingkan dengan kurva lainnya. Pada kurva spesimen SCH terlihat bahwa kurva sebelum respon puncak lebih linear dibandingkan kurva yang sama untuk spesimen SCL. Bahkan untuk spesimen SCH ($f'_c > 60$ MPa) atau kuat tekan beton yang lebih tinggi lagi, kurva tersebut terlihat paling lurus/linear daripada kedua kurva diatas. Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin tinggi mutu beton akan mempunyai kapasitas retak yang lebih tinggi pula. Namun pada beton mutu tinggi daktilitas cenderung menurun.



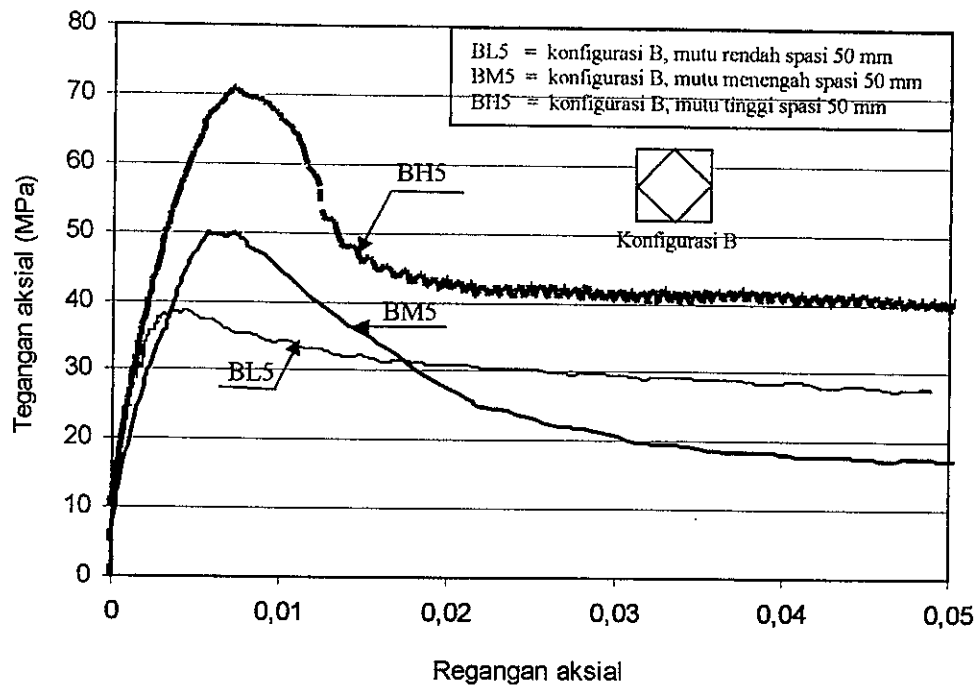
Gambar 4.1 Grafik tegangan – regangan pembebanan secara monotonik.

Perbandingan pengaruh f_c' lainnya terlihat pada gambar 4.2 (konfigurasi A). Semakin tinggi mutu beton, kurva pasca puncak cenderung lebih curam, berarti bahwa daktilitas beton terkekang cenderung menurun. Hal ini menandakan efektifitas kekangan tulangan lateral untuk beton mutu tinggi (AH5) tidak efektif, dan mempunyai nilai peningkatan kekuatan beton terkekang (K) = 1,09. Beton mutu menengah (AM5) mempunyai kurva pasca puncak turun tidak begitu curam, menandakan efektifitas kekangan tulangan lateral lebih efektif dibanding beton mutu tinggi diatas, dengan nilai K =1,05. Beton mutu rendah (AL5) kurva pasca puncak turun tidak begitu curam, yang terlihat pada nilai K =1,16 dimana efektifitas kekangan tulangan lateral paling baik dibanding kedua mutu beton diatas (terlihat pada lampiran B gambar B8).



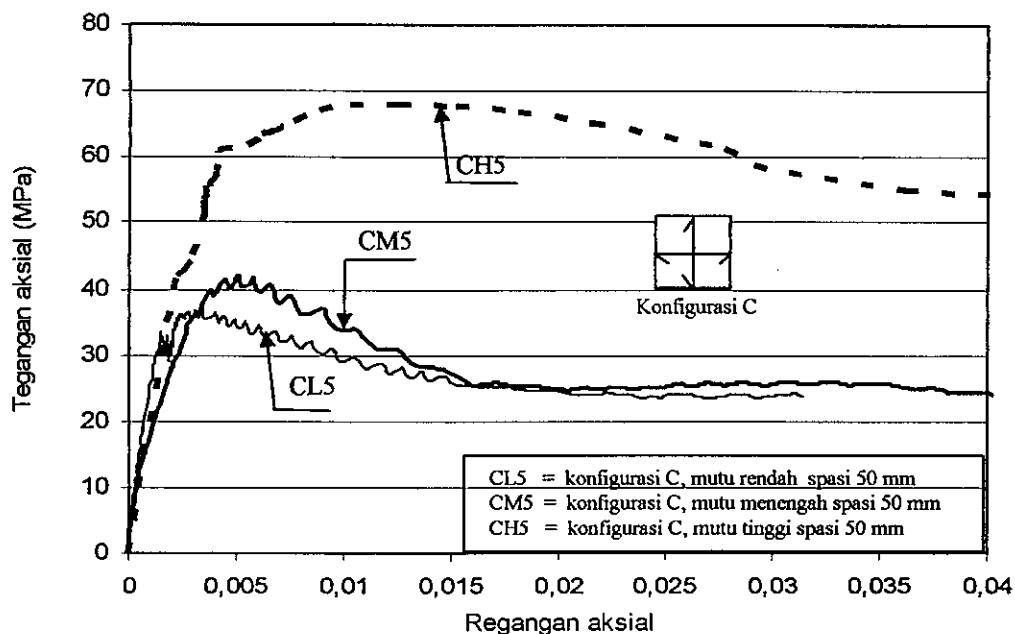
Gambar 4.2 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi A pembebanan secara monotonik.

Pengaruh f_c' untuk konfigurasi tulangan lateral B diperlihatkan pada gambar 4.3. Nilai K untuk spesimen BL5, BM5 dan BH5 masing – masing adalah sebesar 1,16; 1,31 dan 1,29. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kekangan tulangan lateral pada beton mutu tinggi cukup baik dalam meningkatkan kekuatan beton terkekang. Namun demikian perilaku daktilitas pada beton mutu tinggi cenderung menurun, yang ditandai dengan lebih curamnya kurva pasca puncak dibandingkan dengan spesimen yang mempunyai kuat tekan beton lebih rendah.



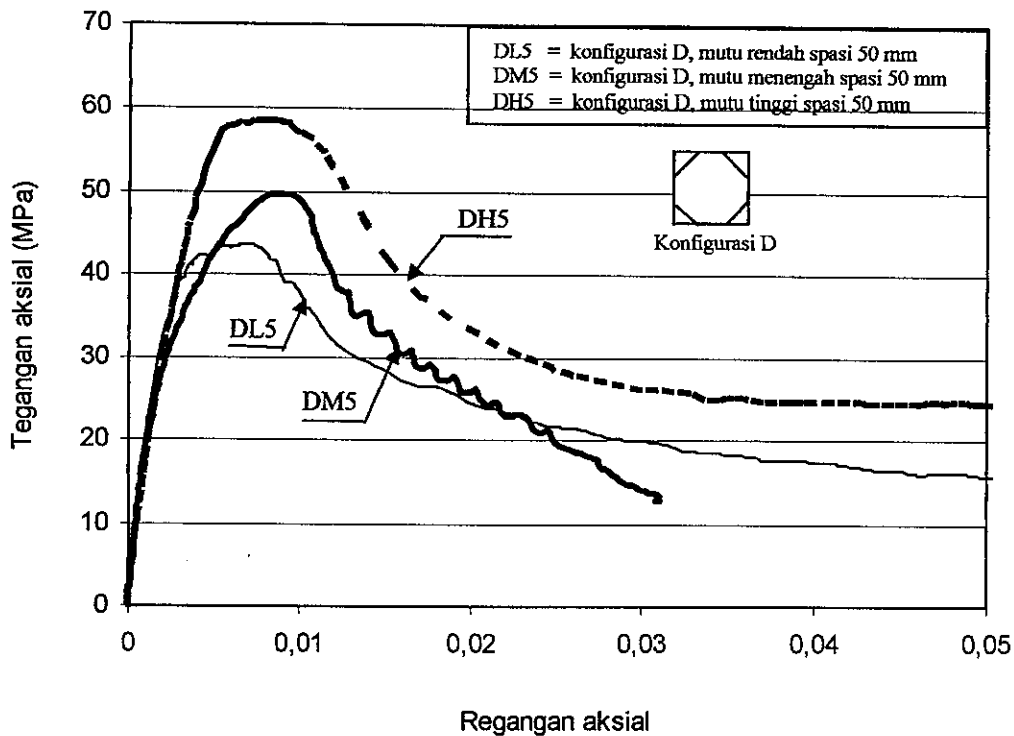
Gambar 4.3 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi B pembebanan secara monotonik.

Pengaruh f_c' untuk konfigurasi tulangan lateral C diperlihatkan pada gambar 4.4. Nilai K untuk spesimen CL5, CM5 dan CH5 masing – masing adalah sebesar 1,27; 1,10 dan 1,24. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kekangan tulangan lateral pada beton mutu tinggi cukup baik dalam meningkatkan kekuatan beton terkekang. Namun demikian perilaku daktilitas pada beton mutu tinggi cenderung menurun, yang ditandai dengan lebih curamnya kurva pasca puncak dibandingkan dengan spesimen yang mempunyai kuat tekan beton lebih rendah.



Gambar 4.4 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi C pembebanan secara monotonik.

Perbandingan pengaruh f_c' konfigurasi tulangan lateral D ditunjukkan pada gambar 4.5. Beton mutu tinggi (DH5) mempunyai nilai peningkatan kekuatan beton terkekang (K) = 1,14, dan kurva pasca puncak terlihat turun agak curam. Menunjukkan perilaku kekangan tulangan lateral tidak efektif. Beton mutu menengah (DM5) dengan nilai K = 1,30, dan beton mutu rendah (DL5) dengan nilai K = 1,50. Keduanya mempunyai kurva pasca puncak turun agak curam, yang berarti menunjukkan perilaku kekangan tulangan lateral tidak efektif serta semakin tinggi mutu beton nilai K semakin turun.

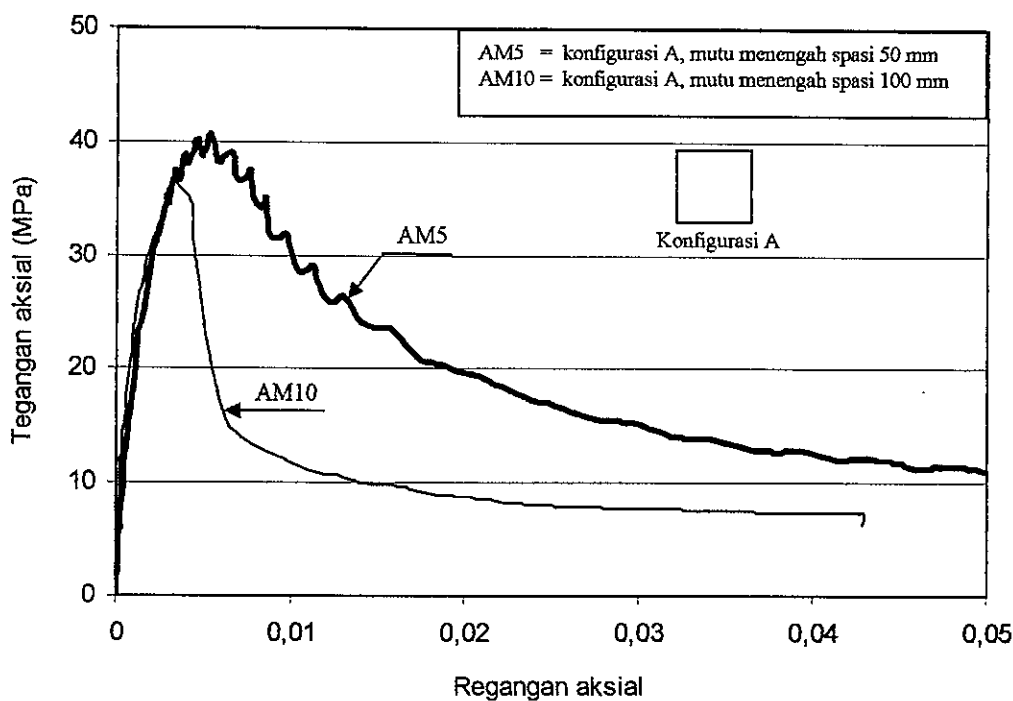


Gambar 4.5 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi D pembebanan secara monotonik.

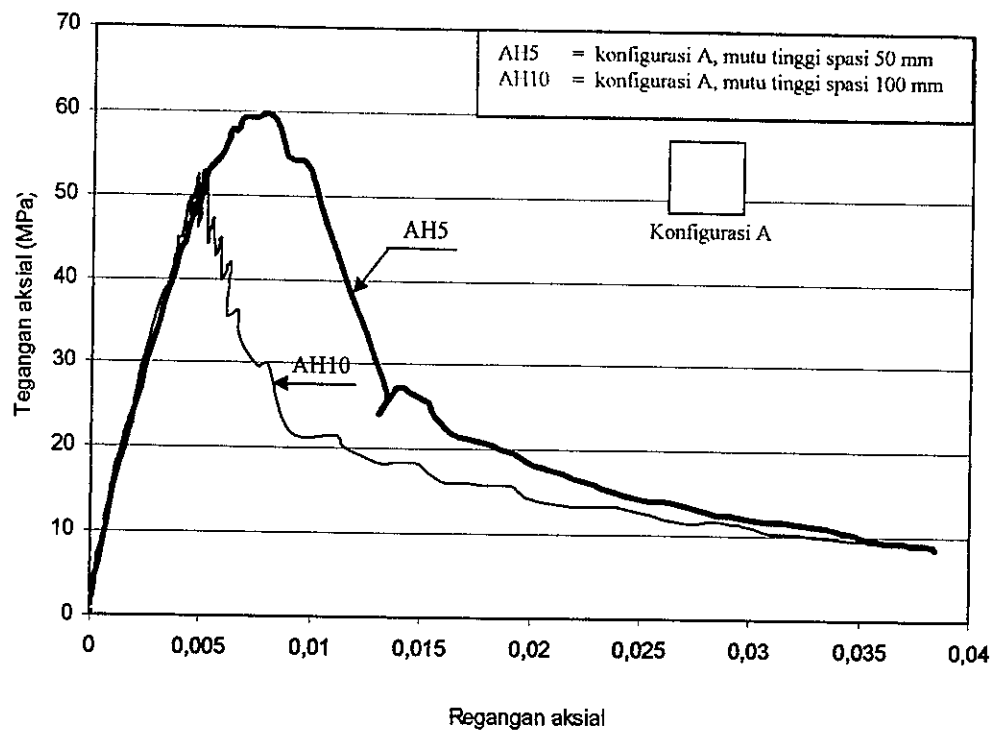
4.2. Pengaruh Spasi Tulangan Lateral

Pengaruh spasi tulangan lateral terhadap kekuatan dan daktilitas beton terkekang untuk beton mutu menengah ($f'_c = 43,50$ MPa) ditunjukkan pada gambar 4.6, yaitu dengan membandingkan spesimen AM5 dan AM10 (terlihat pada lampiran B gambar B9). Nilai K spesimen AM5 adalah 1,05, dimana harga tersebut lebih besar dari nilai K spesimen AM10 ($K = 0,96$). Demikian pula nilai ϵ_{cc}' pada spesimen AM5 ($\epsilon_{cc}' = 0,0045$) yang lebih tinggi dibandingkan harga ϵ_{cc}' spesimen AM10 ($\epsilon_{cc}' = 0,003$). Hasil tersebut mengindikasikan bahwa pemasangan spasi tulangan lateral yang semakin rapat akan meningkatkan nilai K dan kemampuan beton terkekang untuk berdeformasi juga lebih baik.

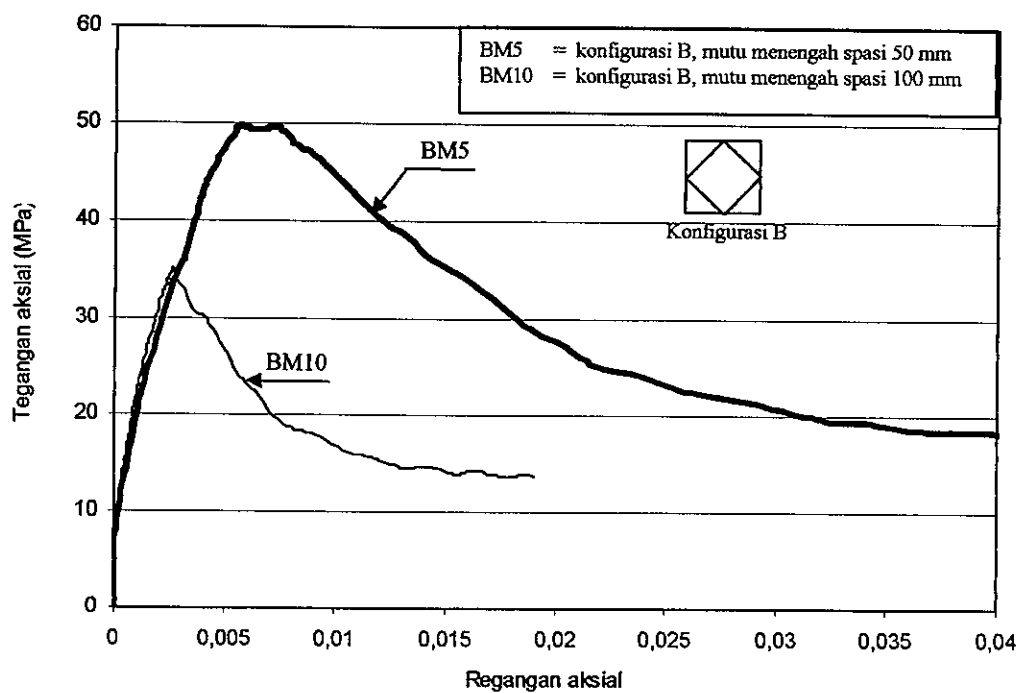
Perilaku yang sama pada pengaruh spasi tulangan lateral juga terjadi untuk perbandingan yang dipasang tulangan lateral konfigurasi B, C dan D, baik untuk beton mutu menengah maupun untuk beton mutu tinggi (gambar 4.7 sampai dengan 4.13).



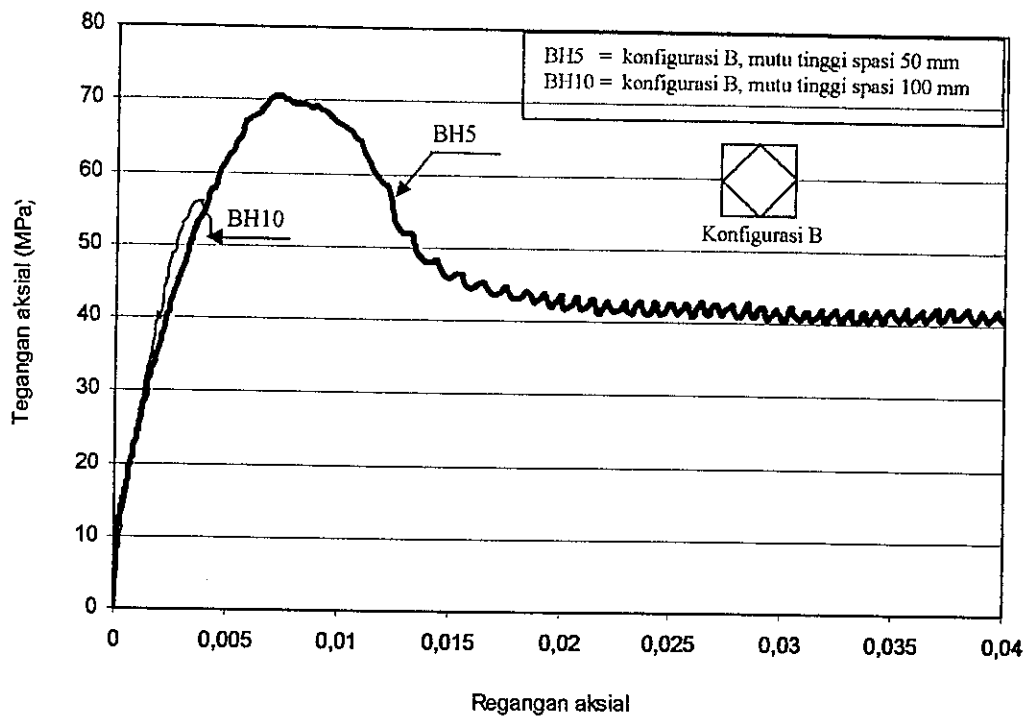
Gambar 4.6 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi A pembebanan secara monotonik.



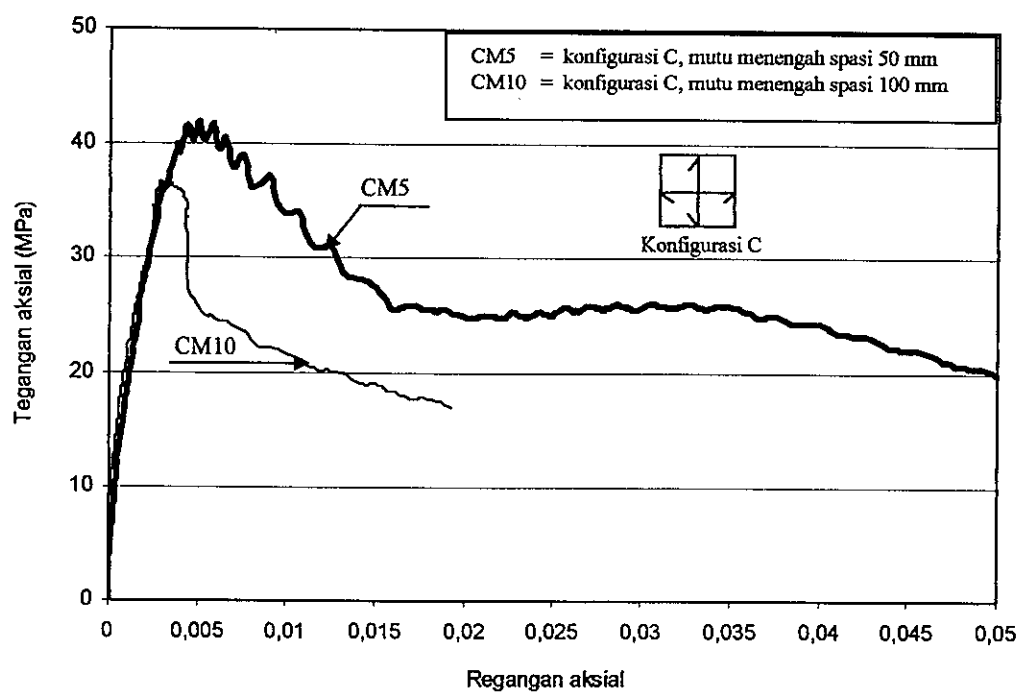
Gambar 4.7 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi A pembebanan secara monotonik.



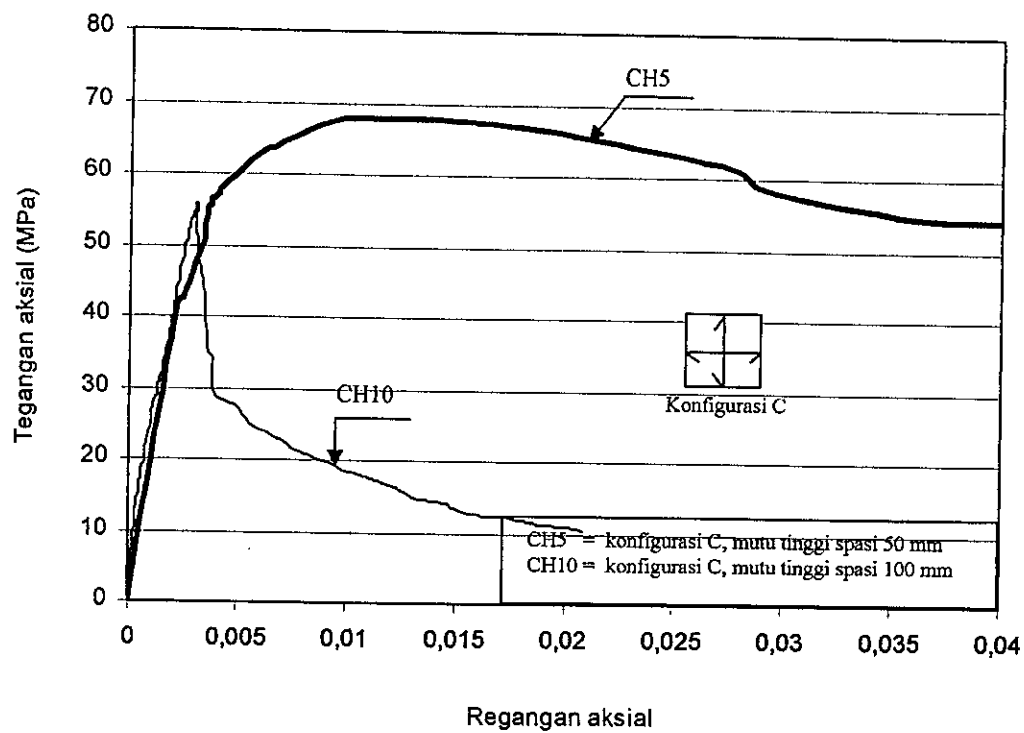
Gambar 4.8 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi B pembebanan secara monotonik.



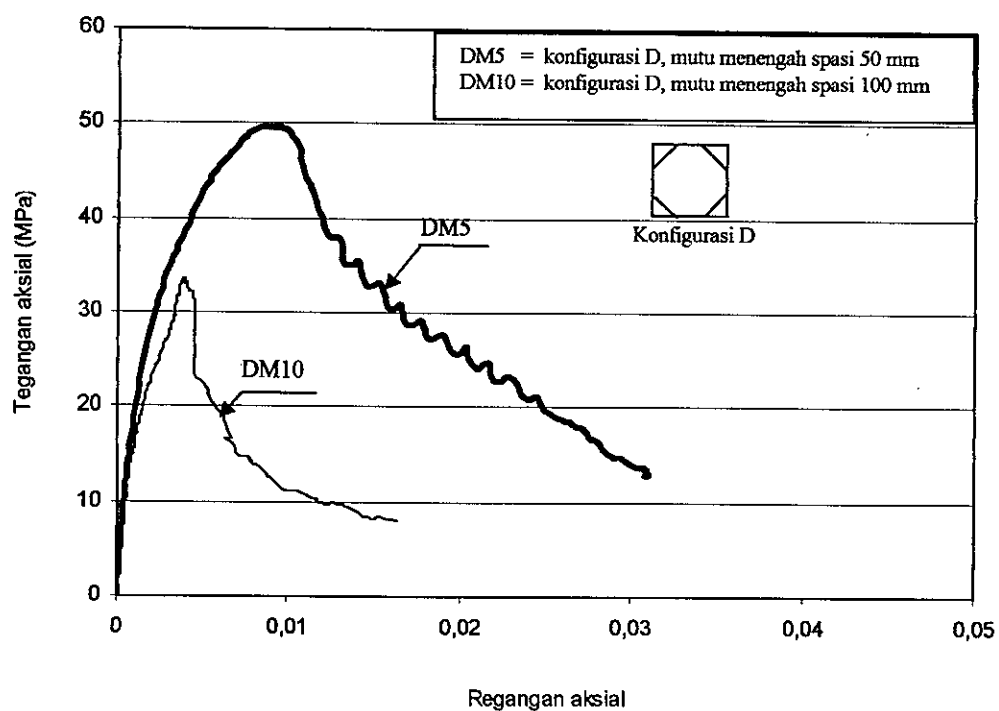
Gambar 4.9 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi B pembebanan secara monotonik.



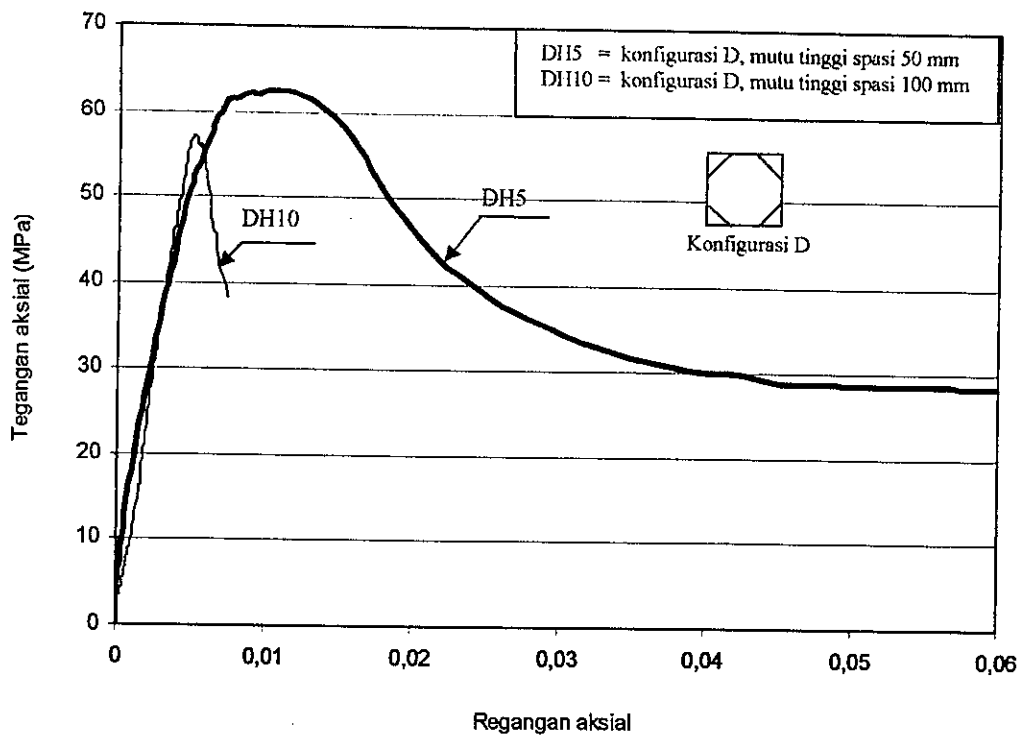
Gambar 4.10 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi C pembebanan secara monotonik.



Gambar 4.11 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi C pembebanan secara monotonik.



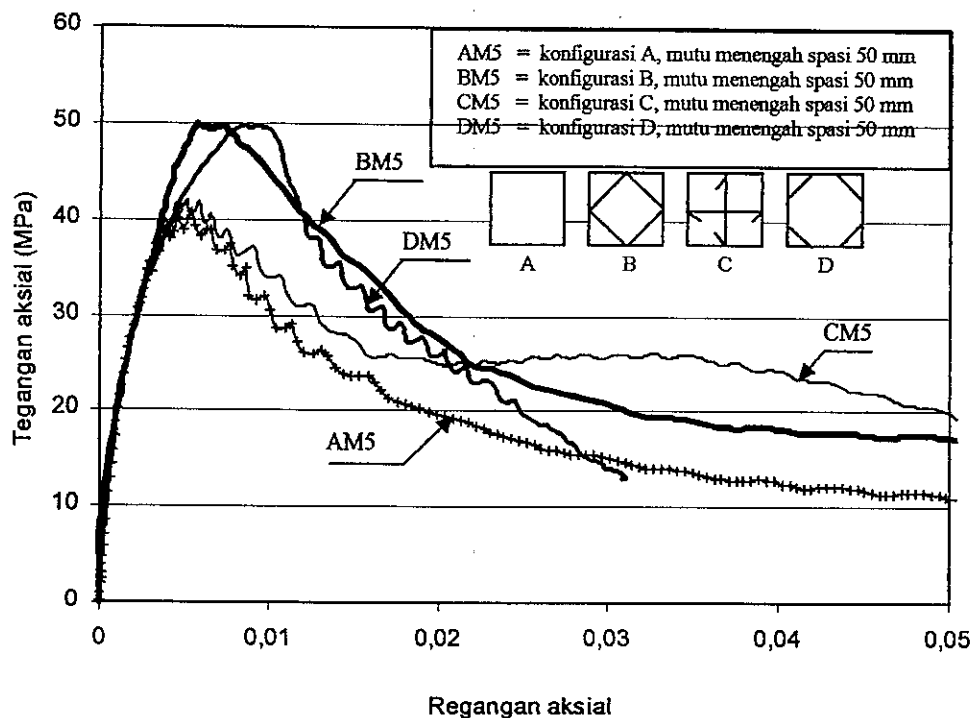
Gambar 4.12 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi D pembebanan secara monotonik.



Gambar 4.13 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi D pembebanan secara monotonik.

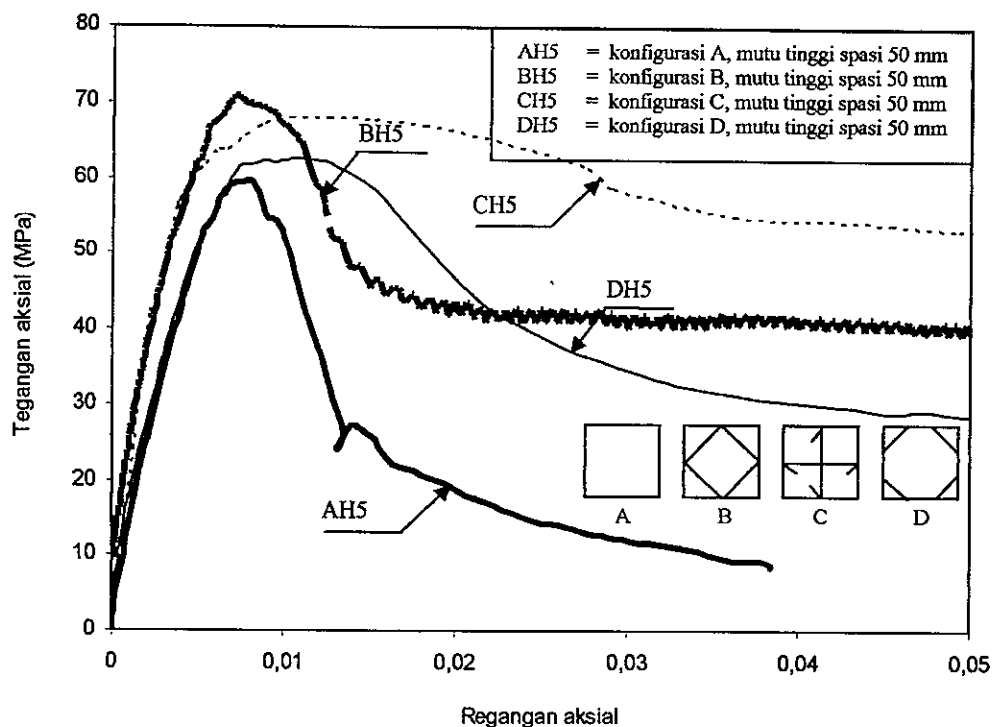
4.3. Pengaruh Konfigurasi Tulangan Lateral.

Gambar 4.14 menunjukkan perbandingan konfigurasi tulangan lateral terhadap kekuatan dan daktilitas beton terkekang untuk beton mutu menengah ($f_c' = 43,50 \text{ MPa}$). Spesimen konfigurasi tulangan lateral A (spesimen AM5) mempunyai nilai $K=1,05$ dan nilai $\epsilon_{cc}' = 0,0045$; konfigurasi B (spesimen BM5) mempunyai nilai $K=1,31$ dan nilai $\epsilon_{cc}' = 0,0057$; konfigurasi C (spesimen CM5) mempunyai nilai $K=1,10$ dan nilai $\epsilon_{cc}' = 0,0051$, sedangkan konfigurasi D (spesimen DM5) mempunyai nilai $K=1,30$ dan nilai $\epsilon_{cc}' = 0,0091$ (terlihat pada lampiran B gambar B10). Dari keempat konfigurasi tersebut, spesimen dengan konfigurasi tulangan lateral B dan D mempunyai kemampuan untuk meningkatkan kekuatan beton terkekang yang relatif sama namun kemampuan untuk berdeformasi yang signifikan konfigurasi tulangan lateral D adalah yang paling baik.



Gambar 4.14 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral A, B, C dan D pembebanan secara monotonik ($f_c' = 43,50 \text{ MPa}$, spasi 50 mm).

Gambar 4.15 menunjukkan perbandingan konfigurasi tulangan lateral terhadap kekuatan dan daktilitas beton terkekang untuk beton mutu tinggi ($f_c' = 66,60 \text{ MPa}$). Konfigurasi A (spesimen AH5) mempunyai nilai $K=1,09$ dan nilai $\epsilon_{cc}' = 0,0078$; konfigurasi B (spesimen BH5) mempunyai nilai $K=1,29$ dan nilai $\epsilon_{cc}' = 0,0071$; konfigurasi C (spesimen CH5) mempunyai nilai $K=1,24$ dan nilai $\epsilon_{cc}' = 0,0125$ dan konfigurasi D (spesimen DH5) mempunyai nilai $K=1,14$ dan nilai $\epsilon_{cc}' = 0,0107$. Dari keempat konfigurasi tersebut, pemasangan tulangan lateral konfigurasi B mempunyai nilai K yang paling tinggi dibandingkan konfigurasi lainnya, sedangkan konfigurasi C mempunyai kemampuan untuk berdeformasi yang paling baik. Hasil tersebut diatas menunjukkan bahwa untuk beton mutu tinggi ternyata pemasangan tulangan lateral konfigurasi B mampu meningkatkan kekuatan beton terkekang yang paling baik, namun pemasangan tulangan lateral konfigurasi C adalah yang paling daktil.



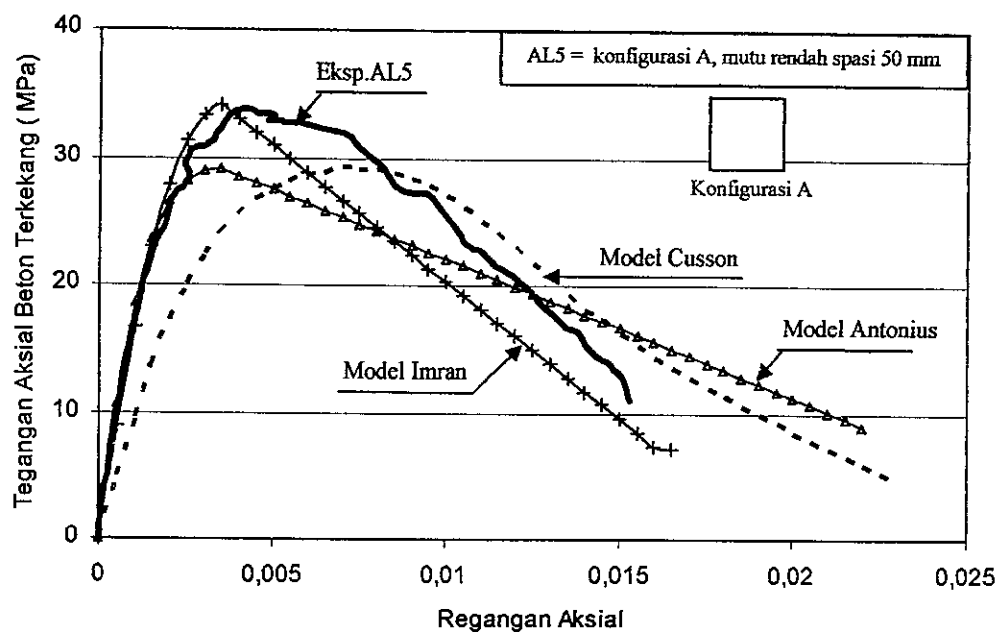
Gambar 4.15 Grafik tegangan – regangan beton terkekang konfigurasi tulangan lateral A, B, C dan D pembebanan secara monotonik ($f_c' = 66,60 \text{ MPa}$, spasi 50 mm).

4.4. Validasi Antara Model – Model Kekangan dengan Hasil Eksperimen.

Hasil pengujian/eksperimen kolom dengan pembebanan secara monotonik dibandingkan dengan model Cusson, model Imran dan model Antonius.

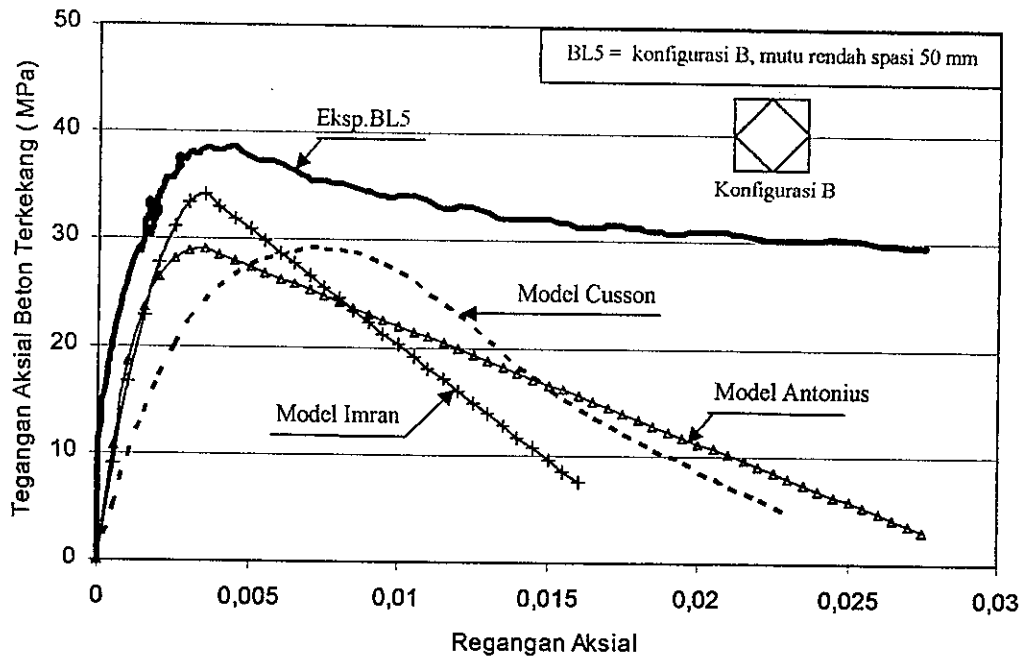
4.4.1. Perbandingan untuk Beton Mutu Rendah Spasi 50 mm

Gambar 4.16 memperlihatkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen spesimen AL5. Berdasarkan gambar tersebut perilaku kurva tegangan – regangan beton terkekang eksperimen mirip dengan model Imran, dibanding model lainnya.



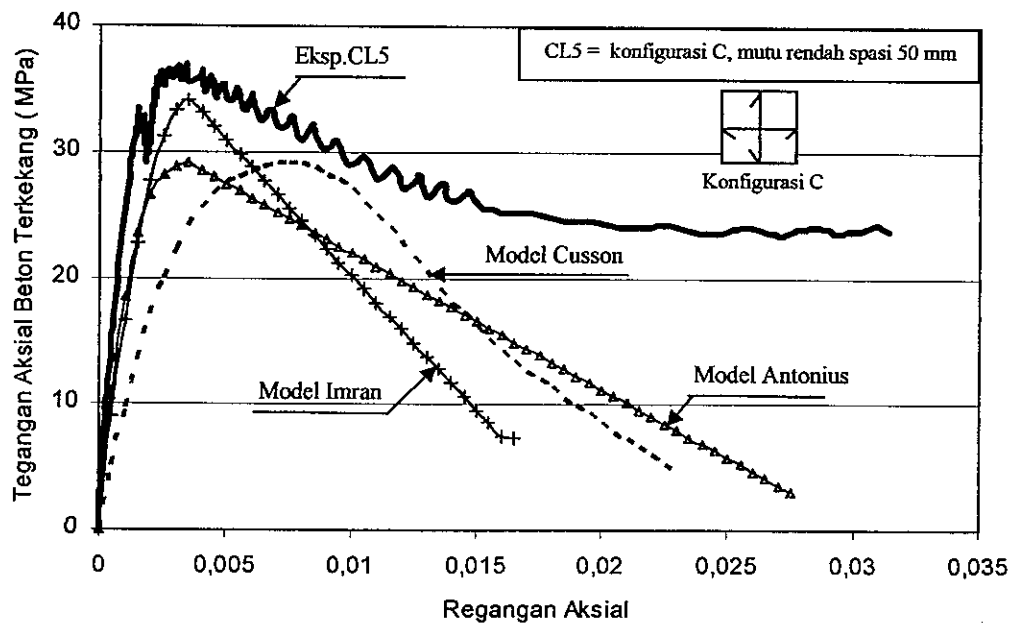
Gambar 4.16 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen AL5

Gambar 4.17 memperlihatkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen spesimen BL5. Berdasarkan gambar tersebut, prediksi model kekangan beton mutu rendah dengan koefisien tulangan lateral B berdeviasi cukup signifikan, baik untuk tegangan puncak beton terkekang maupun perilaku pasca puncak.

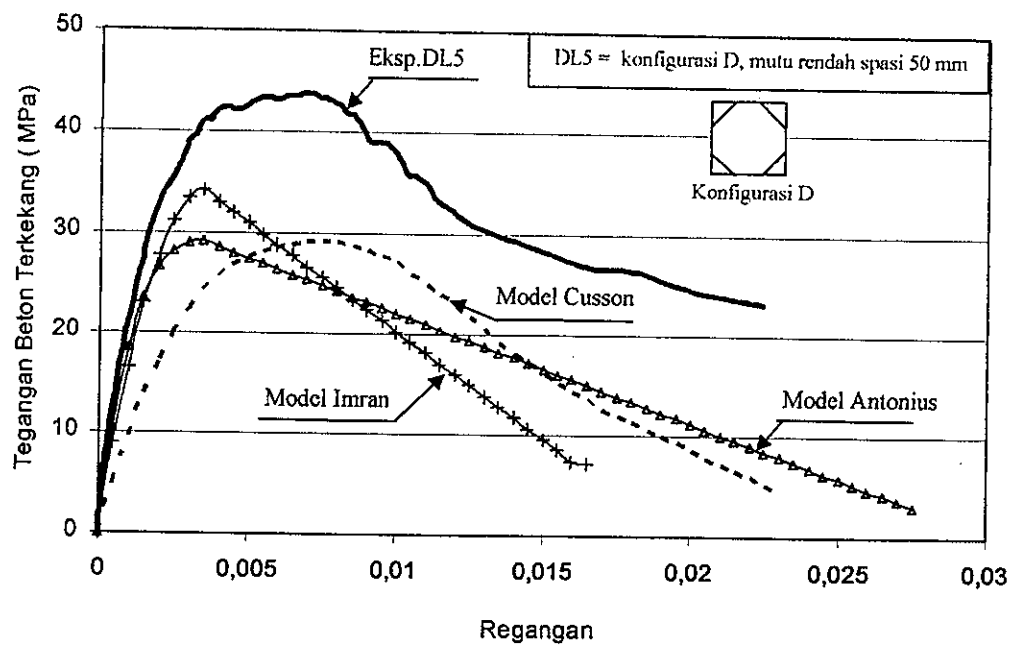


Gambar 4.17 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen BL5.

Hasil yang sama juga terjadi untuk prediksi spesimen CL5 maupun DL5, seperti ditunjukkan pada gambar 4.18 dan gambar 4.19.



Gambar 4.18 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen CL5

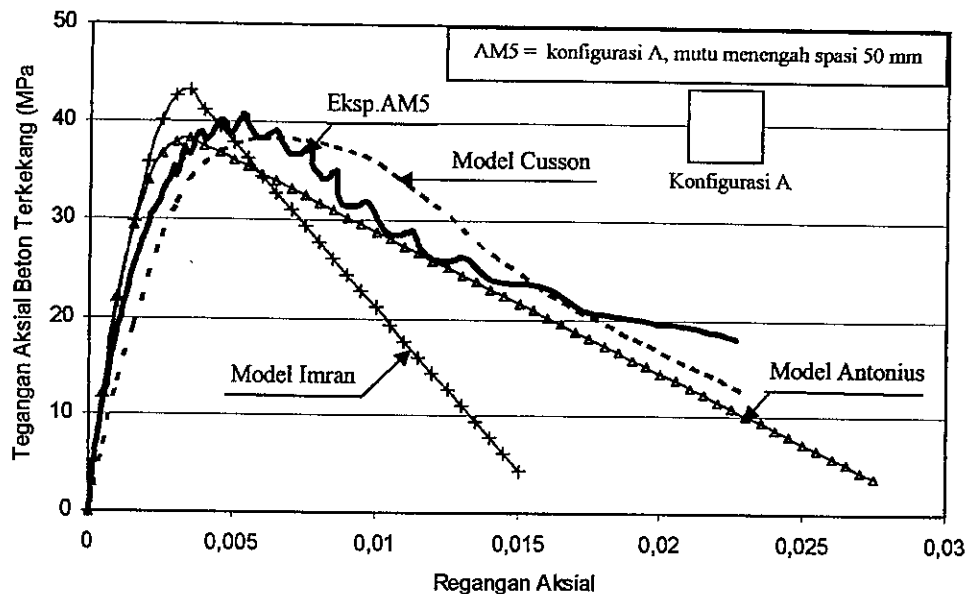


Gambar 4.19 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen DL5.

Berdasarkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen diatas, terlihat bahwa untuk beton mutu rendah ($f_c' = 34,50$ MPa) hanya model Imran yang mendekati dengan hasil eksperimen terutama untuk spesimen dengan konfigurasi tulangan lateral A.

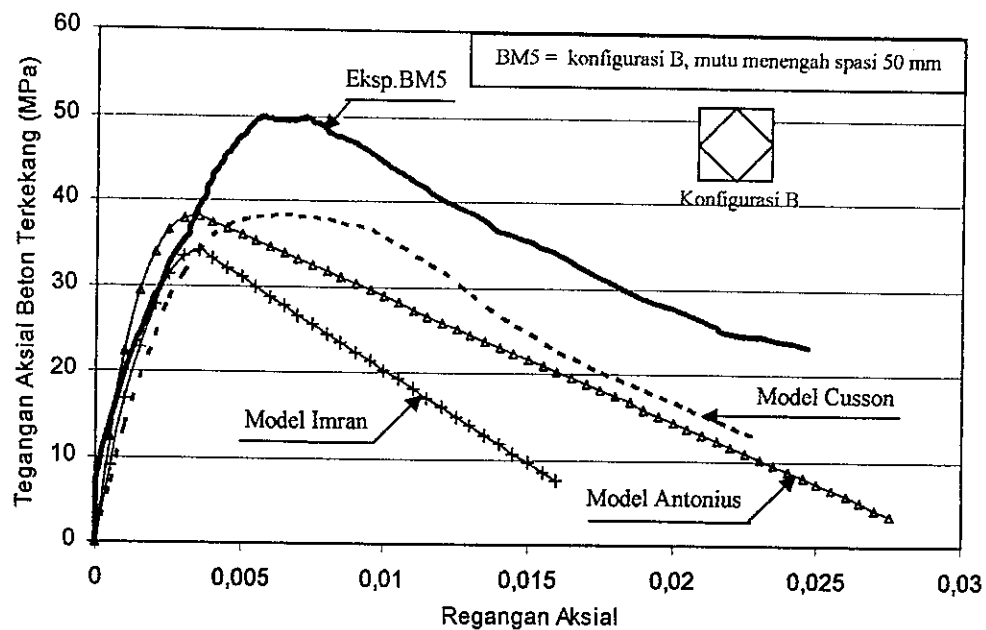
4.4.2. Perbandingan untuk Beton Mutu Menengah Spasi 50 mm.

Gambar 4.20 memperlihatkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen spesimen AM5. Hasil eksperimen spesimen AM5 menunjukkan perilaku kurva tegangan – regangan beton terkekang eksperimen yang mirip dengan model Cusson dan model Antonius.

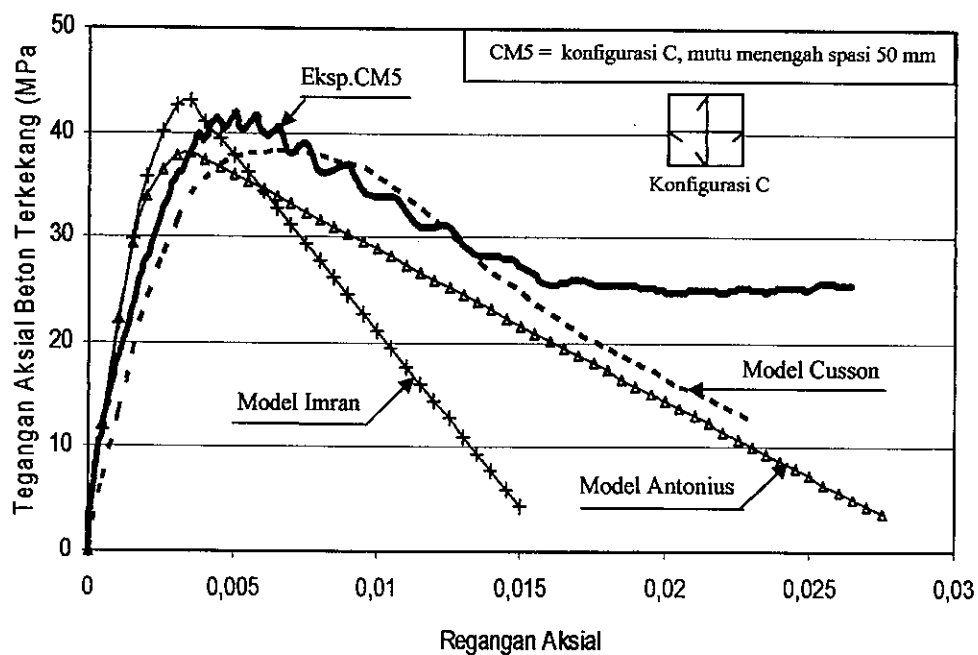


Gambar 4.20 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen AM5.

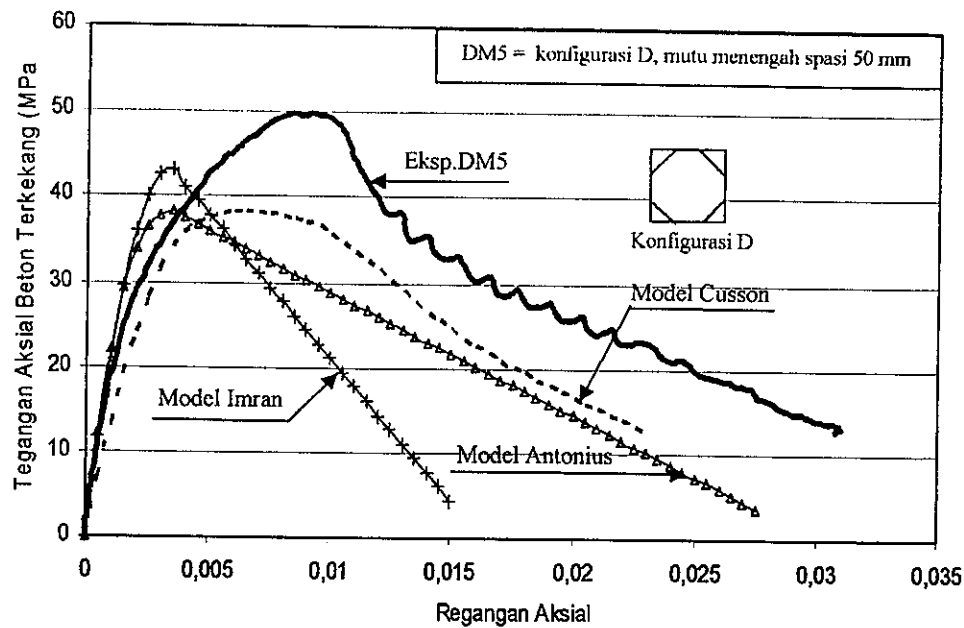
Prediksi perilaku tegangan – regangan beton terkekang untuk beton mutu menengah dengan koefisien tulangan lateral B menyimpang cukup signifikan (gambar 4.21). Sementara itu model Cusson cukup akurat dalam memprediksi untuk spesimen CM5 (gambar 4.22). Sedangkan perbandingan model – model kekangan dengan hasil eksperimen spesimen DM5 berdeviasi cukup besar, baik untuk tegangan puncak beton terkekang maupun kurva pasca puncak (gambar 4.23).



Gambar 4.21 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen BM5.



Gambar 4.22 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen CM5.

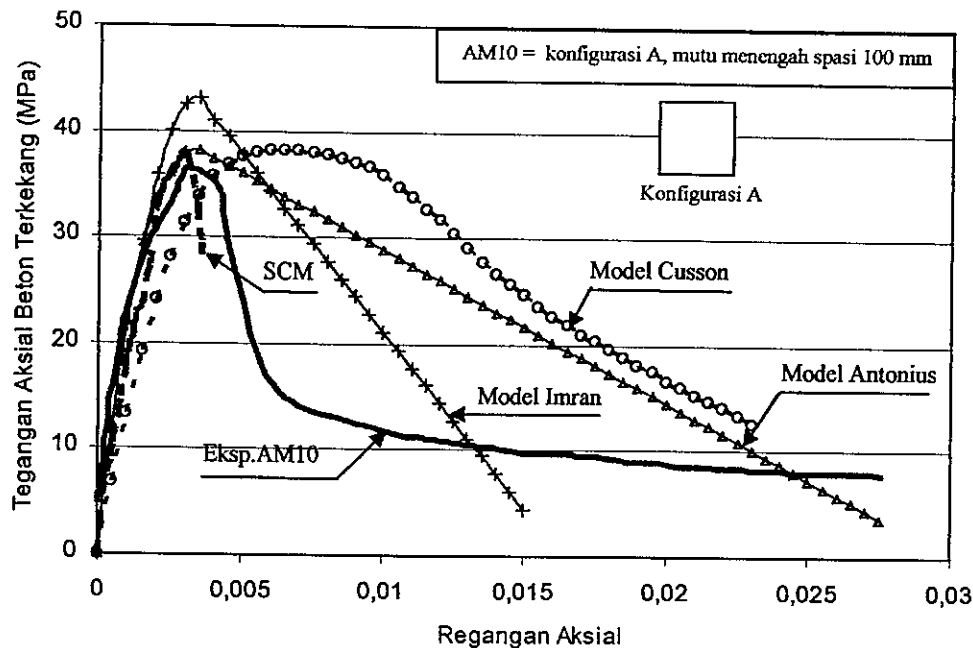


Gambar 4.23 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen DM5.

Berdasarkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen diatas, terlihat bahwa untuk beton mutu menengah ($f_c' = 43,40$ MPa) model Cusson dan model Antonius mendekati dengan hasil eksperimen terutama untuk spesimen dengan konfigurasi tulangan lateral A. Sedangkan kolom dengan konfigurasi tulangan lateral C, model Cusson adalah yang paling akurat.

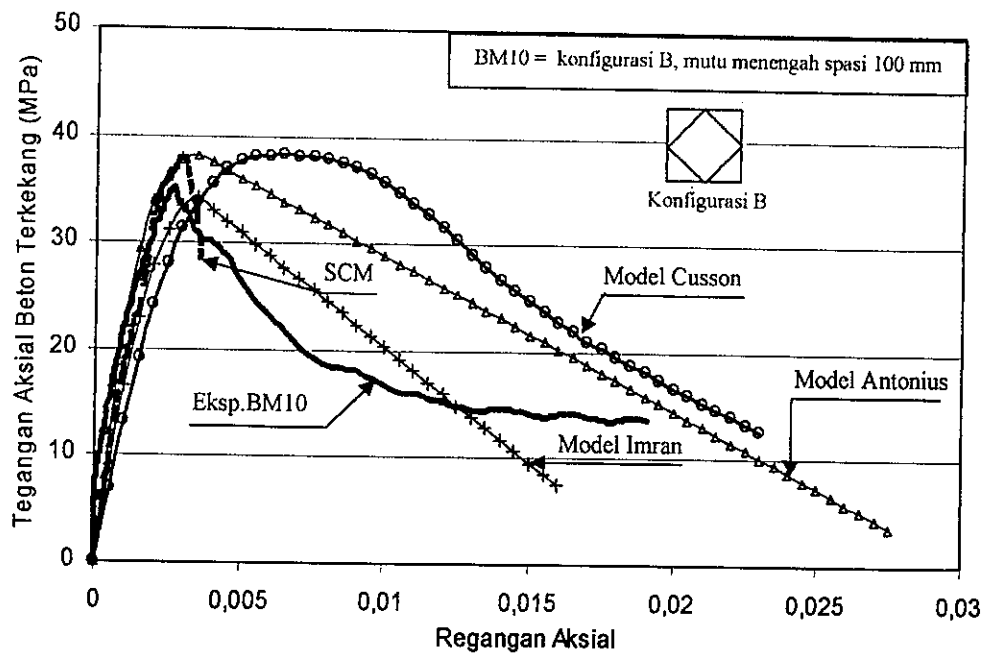
4.4.3. Perbandingan untuk Beton Mutu Menengah Spasi 100 mm.

Gambar 4.24 memperlihatkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen spesimen AM10. Hasil eksperimen spesimen AM10 menunjukkan perilaku kurva pasca puncak beton terkekang yang turun sangat curam, yang menandakan tidak efektifnya fungsi kekangan, dimana kurva hasil eksperimen tersebut mirip kurva spesimen kontrol SCM.



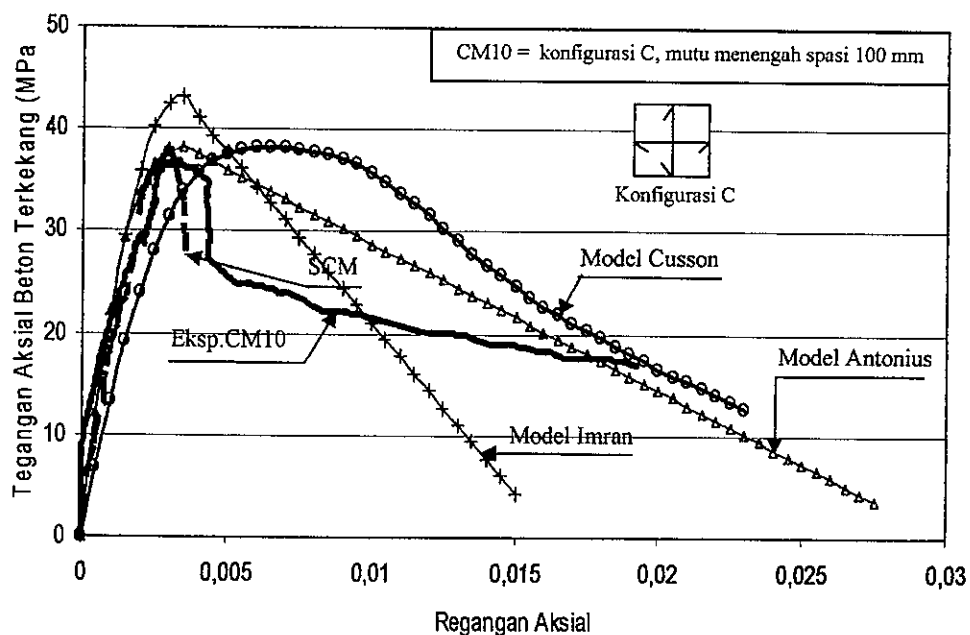
Gambar 4.24 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen AM10.

Gambar 4.25 memperlihatkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen spesimen BM10. Berdasarkan gambar tersebut perilaku kurva tegangan – regangan beton terkekang eksperimen lebih mendekati model Imran.

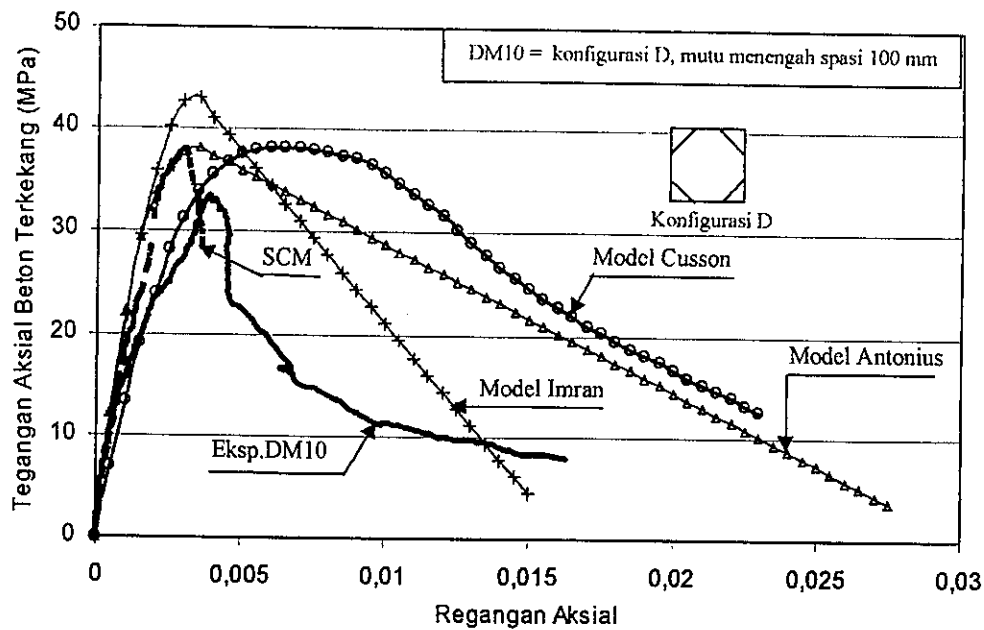


Gambar 4.25 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen BM10.

Prediksi berdasarkan model – model kekangan untuk spesimen CM10 dan DM10 tidak ada yang mendekati (gambar 4.26 dan gambar 4.27).



Gambar 4. 26 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen CM10.

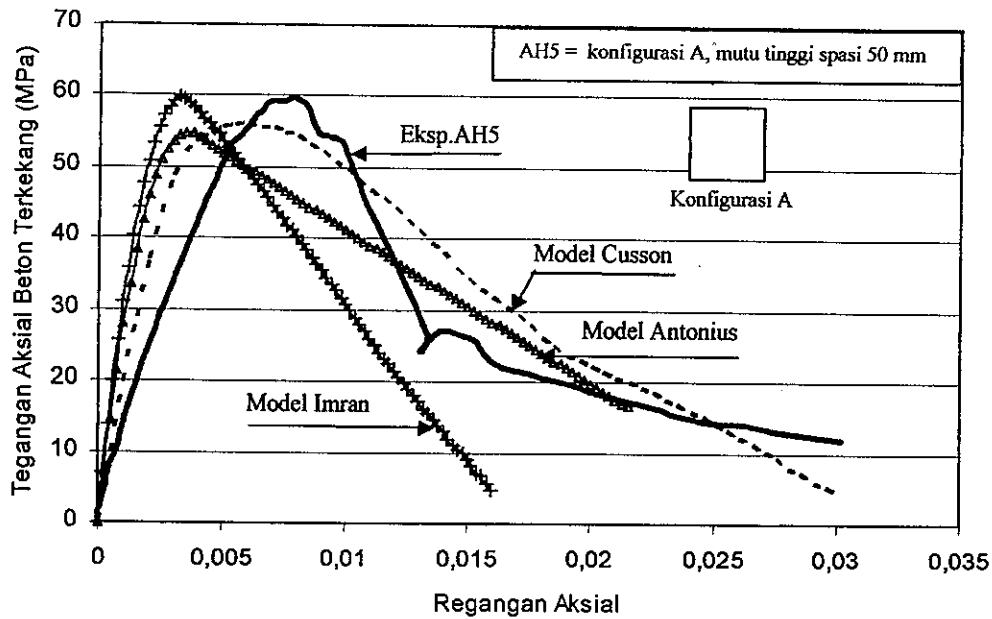


Gambar 4.27 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen DM10.

Berdasarkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen diatas, terlihat bahwa untuk beton mutu menengah ($f_c' = 43,40$ MPa) spesimen kontrol SCM pada umumnya mendekati dengan hasil eksperimen. Hasil ini mengindikasikan bahwa pemasangan spasi tulangan lateral yang lebarnya sama dengan lebar inti kolom akan menjadi tidak efektif, atau dengan kata lain menjadi kolom beton tidak terkekang (*Unconfined*).

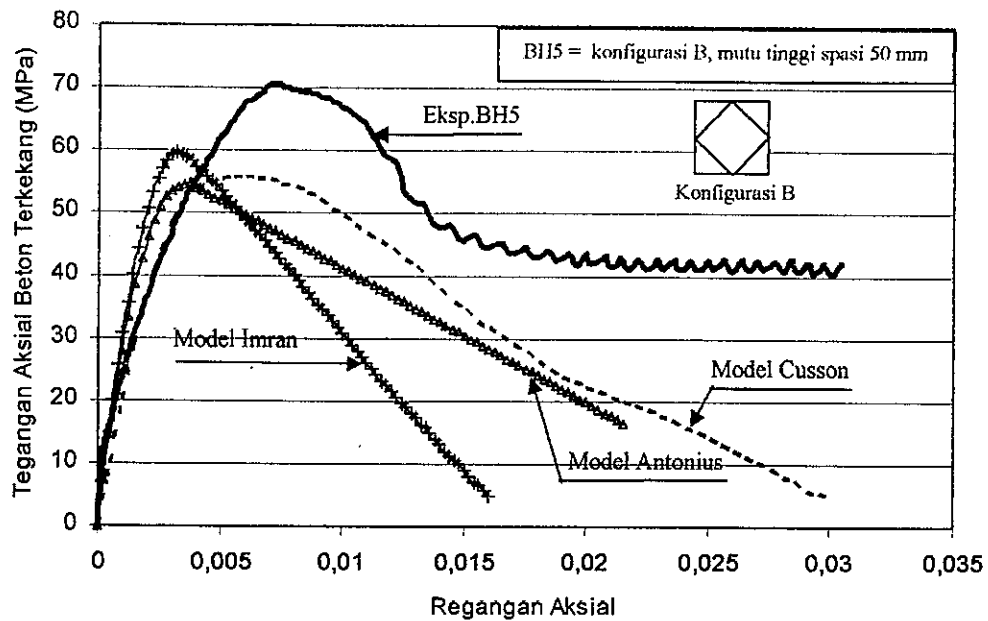
4.4.4. Perbandingan untuk Beton Mutu Tinggi Spasi 50 mm

Prediksi model kekangan berdasarkan model Cusson dan model Antonius lebih mendekati hasil eksperimen spesimen AH5 (gambar 4.28), dibandingkan model lainnya.

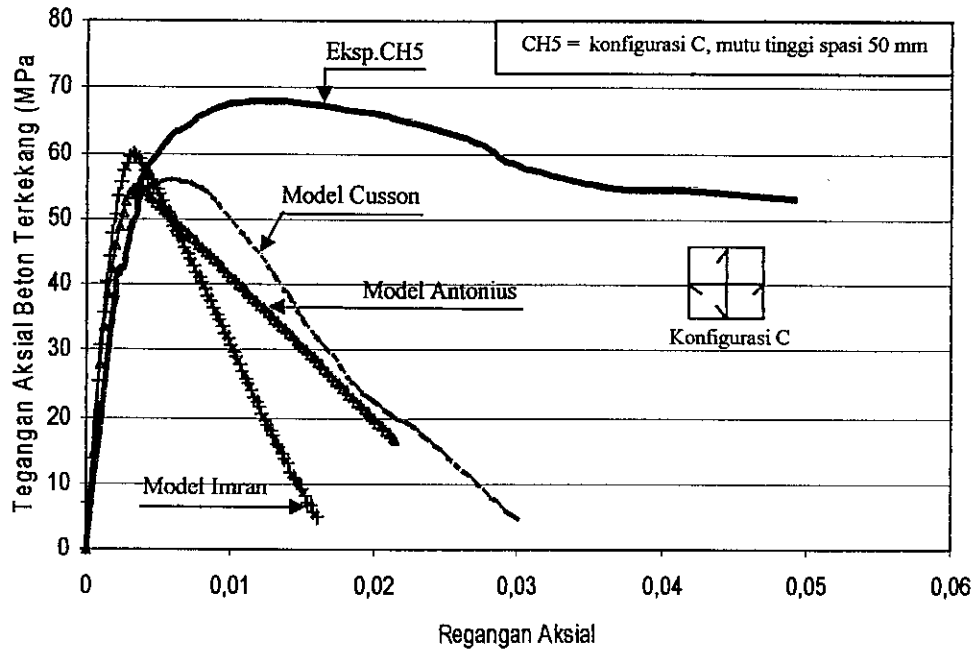


Gambar 4.28 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dengan hasil eksperimen spesimen AH5.

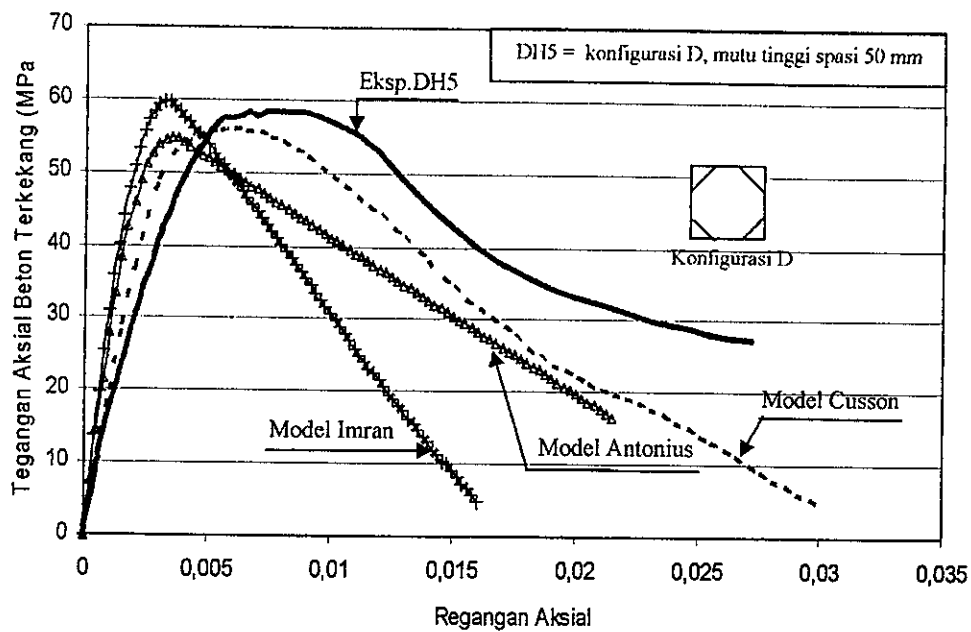
Untuk kurva tegangan – regangan beton terkekang spesimen BH5, CH5 dan DH5 tidak ada yang mendekati dengan semua model – model kekangan (gambar 4.29, gambar 4.30 dan gambar 4.31).



Gambar 4.29 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen BH5.



Gambar 4.30 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen CH5.

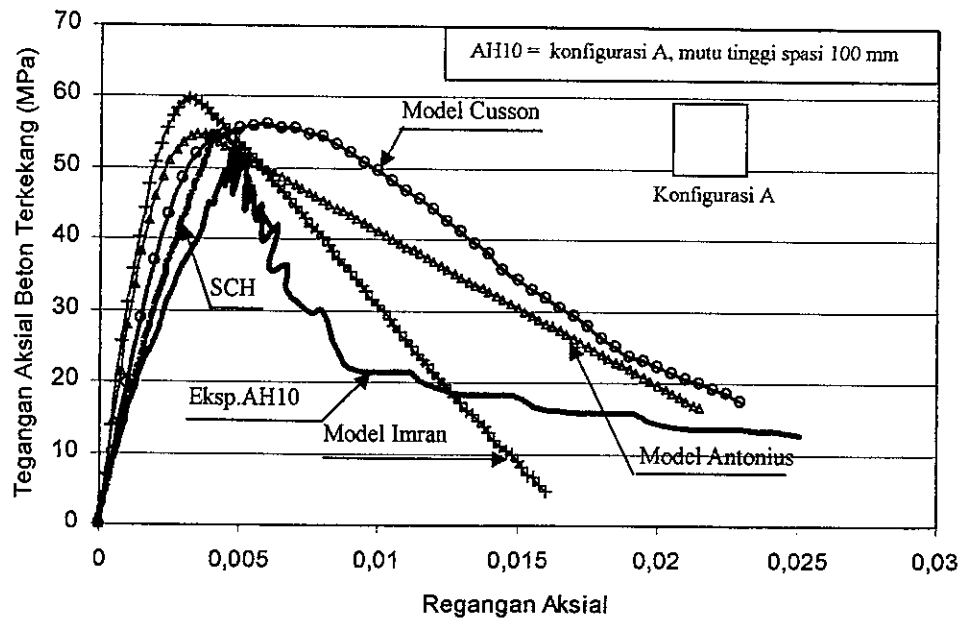


Gambar 4.31 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen DH5.

Berdasarkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen diatas, terlihat bahwa untuk beton mutu tinggi ($f_c' = 66,60$ MPa) model Cusson dan model Antonius adalah yang paling mendekati hasil eksperimen terutama untuk spesimen dengan konfigurasi tulangan lateral A.

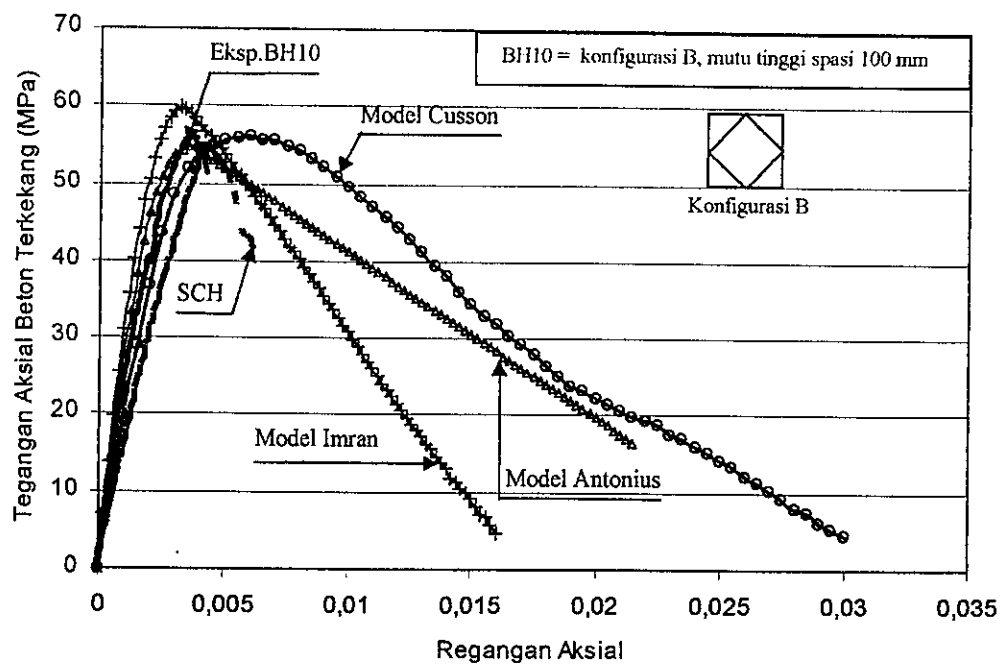
4.4.5. Perbandingan untuk Beton Mutu Tinggi Spasi 100 mm.

Gambar 4.32 memperlihatkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen spesimen AH10. Tidak ada kurva model – model kekangan yang mendekati/sama dengan kurva hasil eksperimen tersebut, baik kurva sebelum maupun kurva pasca puncak.

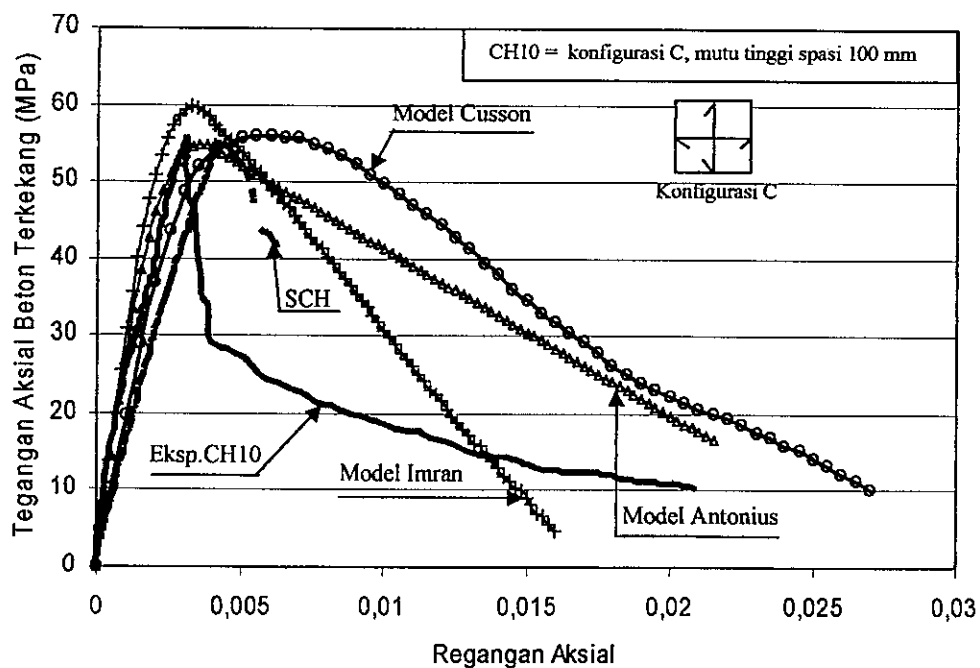


Gambar 4.32 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen AH10.

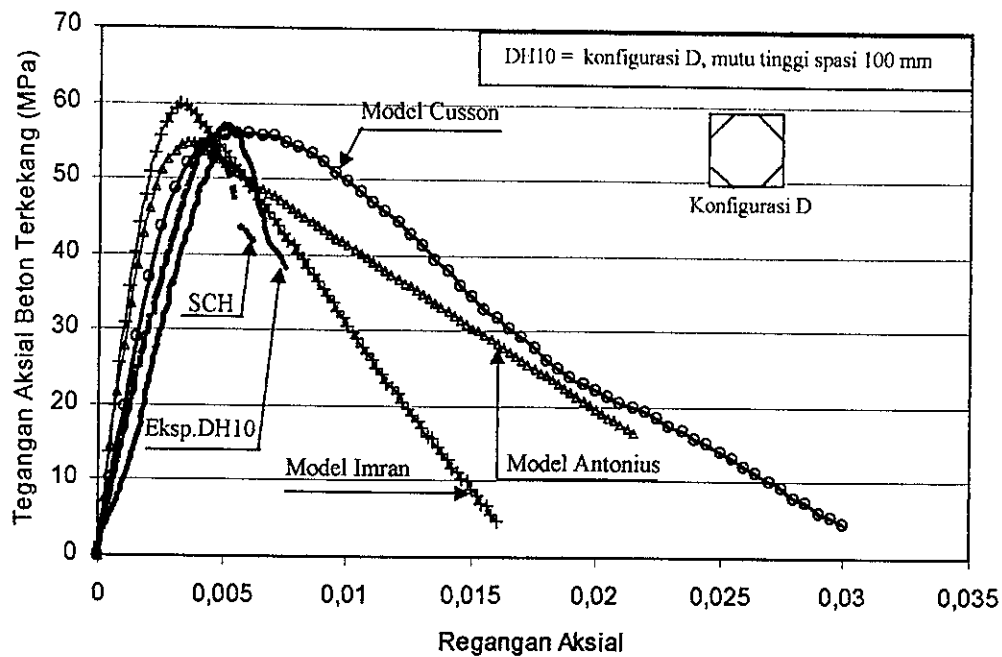
Secara umum tidak ada prediksi model – model kekangan yang mendekati hasil eksperimen pada spesimen BH10, CH10 dan DH10. Hasil ini terlihat pada gambar 4.33, gambar 4.34 dan gambar 4.35.



Gambar 4.33 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen BH10.



Gambar 4.34 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen CH10.



Gambar 4.35 Kurva model – model tegangan – regangan beton terkekang dan hasil eksperimen spesimen DH10.

Berdasarkan perbandingan antara model – model kekangan dan hasil eksperimen diatas, terlihat bahwa untuk beton mutu tinggi ($f_c' = 66,60$ MPa) tidak ada kurva model – model kekangan yang mendekati/sama dengan kurva hasil eksperimen.

BABV

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi eksperimental yang telah dilakukan maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Peningkatan kekuatan dan daktilitas beton mutu tinggi terkekang cenderung menurun apabila kuat tekan beton yang digunakan meningkat.
2. Perilaku kekuatan dan daktilitas kolom beton mutu tinggi terkekang sangat dipengaruhi oleh kuat tekan beton dan kuantitas tulangan lateral yang dipasang.
3. Tidak ada peningkatan kekuatan beton terkekang (K) untuk kolom beton mutu menengah dan beton mutu tinggi pada semua konfigurasi tulangan lateral yang dipasang, apabila spasi tulangan lateral adalah sama dengan lebar penampang inti kolom. Hasil ini menunjukkan bahwa pemasangan spasi tulangan lateral yang lebar atau jarak sama dengan lebar inti kolom beton akan menjadi tidak efektif, atau dengan kata lain kolom beton menjadi tidak terkekang (*Unconfined*).
4. Secara umum, model Imran lebih dekat dengan hasil eksperimen beton mutu rendah ($f_c' < 40$ Mpa). Hasil ini tidak sejalan dengan batasan kuat tekan beton (f_c') yang dikeluarkan oleh Imran, karena model Imran diturunkan dari hasil pengujian kekangan aktif.
5. Prediksi perilaku kolom beton hasil eksperimen dengan model – model kekangan mutu rendah, menengah dan tinggi yang telah dikembangkan oleh beberapa peneliti berdeviasi cukup signifikan apabila diterapkan dengan hasil eksperimen, terutama dalam memodelkan perilaku setelah respon puncak.

5.2. Saran – Saran

Studi eksperimental ini merupakan dasar bagi pengembangan pengetahuan perilaku struktur kolom beton mutu rendah, menengah dan tinggi dengan memperhatikan parameter agregat yang sesuai dengan kondisi di Indonesia. Berkaitan dengan hal tersebut, beberapa saran juga diberikan sebagai berikut :

1. Perlunya diteliti perilaku kolom beton mutu rendah, menengah dan tinggi terhadap beban siklik baik untuk penampang bulat maupun penampang persegi, karena berkaitan erat dengan kondisi geografis Indonesia yang mempunyai banyak daerah rawan gempa.
2. Perlunya dikembangkan penelitian terhadap kolom langsing, dimana efek stabilitas harus diperhatikan terhadap perilaku kolom.
3. Perlu dikembangkan lagi konfigurasi tulangan lateral yang lain, kemungkinan bisa untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom.
4. Untuk mengantisipasi pembebanan yang cukup besar perlu dipilih model – model kekangan yang sesuai dengan fungsinya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdel – Fatah, H and Ahmad, S.H (1989); *Behavior of Hoop – Confined High Strength Concrete unde Axial and Shear Loads*, ACI Structural Journal, V.86 No.6, Nov. – Dec. 1989, 652 – 659.
- [2] ACI Committee 363 (1992), *State-Of-The-Art Report on High-Strength Concrete*, ACI 363R-92.
- [3] ACI – ASCE Committee 441 (1997); *High – Strength Concrete Columns; State of the Art*, ACI Structural journal, May – June 1997.
- [4] ACI 318 – 99/ACI 381R – 99 (1999); *Building code requirements for reinforced concrete and commentary*; Am. Concrete Inst., Detroit, Michigan.
- [5] Ahmad, S.H. and S.P.Shah (1982), *Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement*, ACI Journal, V.79, No.6, Nov.-Dec., 484-490.
- [6] Antonius, I. Imran dan R. Suhud dan D.R. Munaf (1999); *Respon Kolom Beton Mutu Tinggi terhadap Beban Konsentris*; Proceeding Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan, ITB Bandung 4 – 5 Nopember 1999, pp. IV 19 – IV 29.
- [7] Antonius, R. Suhud; P.A. Wahyudi; Suparyanto dan A. Krisdiyanto (2002); *Peningkatan Kekuatan dan Daktilitas Kolom Beton Mutu Tinggi terhadap Beban Tekan Konsentris*; Lap. Penelitian Hibah Bersaing IX/I & IX/2 Perg. Tinggi, Kontrak No. 075/P21PT/III/2001 dan No. 083/P21PT/DPPM/IX/2002, November 2002 Depdiknas.
- [8] Azizinamimi, A., Sharon S.B. Kuska, P. Brungardt and E. Hatfiend (1994), *Seismic behavior of square high-strength concrete columns*, ACI Structural Journal, V.91, No.3, May-June, 336-345.
- [9] CEB-FIP (1990), *Structural Concrete*, manual textbook Vol.1, FIB.
- [10] Collins, M.P. and D. Mitchell (1991), *Prestressed Concrete Structures*, Prentice Hall Int.
- [11] Cusson, D. and Paultre (1995), *Stress-strain model for confined high-strength concrete*, J. of Structural Engineering ASCE, V.121, No.3, March, 468-477.
- [12] Departemen Pekerjaan Umum (1992), *Tata Cara Penghitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, SNI 03 – 2847 – 1992.
- [13] Dilger, W.H, R. Koch and R. Kowalczyk (1984), *Ductility of plain and confined concrete under different strain retes*, ACI Journal, Jan-Feb., 73-81.
- [14] Diniz, S.M.C. and D.M. Frangopol (1997), *Strength and ductility simulation of high strength concrete columns*, J. of Structural Eng. ASCE, V.123, No.10, October, 1365-1374.

- [15] Foster, S.J.; J. Liu and S.A Sheikh (1998); *Cover Spalling in HSC Columns Loaded in Concentric Compression*; J. of Struct. Eng., ASCE, V. 124, No. 12, December 1998, pp. 1431 – 1437.
- [16] Imran; I.; B. Budiono; D.R. Munaf and M. Mustopo (1999); *On the mechanical behaviour of concrete structures and materials (experimental and analytical studies)*, Final report, Urge project, chapter 2.
- [17] Konig, G. and G. Simsch (1996), *Failure mechanism and load-deformation behavior of HSC columns with confining reinforcement*, Proc. 4th Int. Symp. On Utilization of HS/HPC, V.3, Paris, 777-786.
- [18] MacGregor, J.G. (1997), *Reinforcement Concrete, Mechanics and Design, Third Edition*, Prentice Hall.
- [19] Mander, J.B., M.J.N. Priestly and R. Park (1998). *Theoretical Stress – Strain Model for Confined Concrete*, J. of Structural Eng., V. 114, No.8, August 1988, pp. 1804 – 1824.
- [20] Mander, J.B., M.J.N Priestly and R. Park (1998). *Observed Stress – Strain Behavior of Confined Concrete*, J. of Structural Eng., V. 114, No.8, August 1988, pp. 1804 – 1824.
- [21] Mansur, M.A.; M.S. Chin; and T.H. Wee (1997), *Stress-strain relationship of confined high-strength plain and fiber concrete*, J. of Materials in Civil Eng. ASCE, V.9, No.4, Nov., 171-179.
- [22] Moehle, J.P. and Cavanagh, T. (1985); *Confinement Effectiveness of Crossties In RC*; J. of Struct. Eng. ASCE, V. 111, No. 10, October 1985, 2105 – 2120.
- [23] Martinez, S.; A.H. Nilson and F.O. Slate (1984), *Spirally-reinforced high-strength concrete columns*, ACI Journal, V.81, No.5, Sept.-Oct., 431-442.
- [24] Muguruma, H., M. Nishiyama and F. Watanebe (1993), *Stress-strain curve model of concrete with a wide-range of compressive strength*, Proc. Of High-Strength Concrete Conf., Lillehamer, Norway, 314-321.
- [25] Nagashima, T., S. Sugano; H. Dimura and A. Ichidawa (1992), *Monotonic axial compression test on ultra-high-strength concrete tied columns*, Proc. Of 10th World Conf. on Earthquake Eng., Madrid, V.5, 2983-2988.
- [26] Razvi, S.R. and M. Saatcioglu (1999), *Confinement model for high-strength concrete*, J. Structural Eng. ASCE, V.125, No.3, March., 281-289.
- [27] Saatcioglu, M and D. Baingo (1999), *Circular high-strength concrete columns under simulated seismic loading*, J. of Structural Eng. ASCE, V.125, No.3, March, 272-280.
- [28] Saatcioglu, M. and S.R. Razvi (1998), *High-strength concrete columns with square sections under concentric compression*, J. Of Structural Eng, ASCE, V.124, No.12 December, 1438-1447.

- [29] Scott, B.D.; R. Park and M.J.N. Priestly (1982); *Stress – Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates*; ACI Journal, January – February 1982, pp. 13 – 27.
- [30] Sheikh, S.A. and S.M. Uzumeri (1980); *Strength and Ductility on Tied Concrete Columns*, J. of Struct. Division, ASCE, V. 106, No. ST5, May 1980, pp. 1079 – 1101.
- [31] Sheikh, S.A and S.M Uzumeri (1982), *Analytical model for concrete confinement in tied columns*, J. of Structural Division ASCE, V.108, No.ST12 December, 2702-2722.
- [32] Watson, S; F.A. Zahn and R. Park.(1992); *Confining Reinforcement for Concrete Columns*, J. of Structural Eng. V.120, No. 6, June 1994, pp. 1798 – 1823.